

REGINA DO ROCIO DE ANDRADE

MENSURAÇÕES DENDROMÉTRICAS COM CÂMERAS DIGITAIS CALIBRADAS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de "Mestre em Ciências Florestais".

Orientador:
Prof. Dr. Flávio Felipe Kirchner

CURITIBA
2001



Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias – Centro de Ciências Florestais e da Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Av. Lothário Meissner, 3400 - Jardim Botânico – CAMPUS III
80210-170 - CURITIBA - Paraná
Tel. (41) 360.4212 - Fax: (41) 360.4211 - <http://www.pgfloresta.ufpr.br>
e-mail: pinheiro@floresta.ufpr.br


PARECER


Defesa nº 422

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir a mestranda *REGINA DO ROCIO DE ANDRADE* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado “MENSURAÇÕES DENDROMÉTRICAS COM CÂMARAS DIGITAIS CALIBRADAS”, é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** da acadêmica, habilitando-a ao título de *Mestre em Ciências Florestais*, na área de concentração em *Manejo Florestal*.



Dr. Flávio Felipe Kirchner

Professor e pesquisador do Departamento de Ciências Florestais da UFPR
Orientador e presidente da banca examinadora


Dr. Rudiney Soares Pereira
Professor e pesquisador da UFSM - RS
Primeiro examinador


Dr. Carlos Aurelio Nadal
Professor e pesquisador do Departamento de Geomática da UFPR
Segundo examinador

Curitiba, 21 de fevereiro de 2001.


Nivaldo Eduardo Rizzi
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Franklin Galvão
Vice-coordenador



DEDICATÓRIA

Ao Claudemir , meu esposo, aos meus filhos Alessandro
Johann, Rebecca Caroline e Maria Vitória e aos meus pais José e Maria.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas, instituições e empresas que contribuíram para a realização deste trabalho. Especialmente:

Ao Prof. Dr. Flávio Felipe Kirchner, pela orientação, apoio e incentivo;

Aos meus co-orientadores, Prof. Dr. José Bittencourt de Andrade e Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado, pela orientação apoio e incentivo;

À Eliane Maria Stroparo, chefe da Biblioteca “Plínio Alves Monteiro Tourinho”, pela revisão das normas para dissertação e catalogação.

Ao colega e amigo Ms Luciano Farinha Watzlawick, pela ajuda na coleta de dados em campo e incentivo;

Aos amigos e colegas do Curso;

À empresa Infoimage, representada pelo Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira , pelo fornecimento da câmera digital e programas necessários à tomada de dados;

À empresa Geokosmos, representada pelo Dr. José Bittencourt de Andrade, por disponibilizar os programas usados neste trabalho de dissertação.

À empresa Engefoto, representada pelo Sr. Renato Asineli Filho, pelo apoio e disponibilizar equipamentos, programas e pessoal para a realização deste trabalho;

Aos funcionários da Engefoto, Eng. José Valentim Banach, Marcelo Cardoso Gonçalves, Carlos Roberto Mello, Nilton Gomes, Eduardo Marcalini, Roseli A. Santos , Ari Cristiano Raimundo, Mirian Isabel Say e Priscilla Alves Miquilussi pela contribuição.

Ao Sr. Lineu Dal Lago, assistente administrativo da Fazenda Experimental Canguiri, e demais funcionários.

À CAPES pelo apoio financeiro;

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, por possibilitar a realização deste Curso e o presente trabalho;

Aos meus familiares, em especial meu esposo e filhos, pela compreensão, incentivo, paciência e estímulo, sem o qual certamente não seria possível realizar este trabalho;

Aos meus pais, José e Maria, que foram sempre meus mestres, que cuidaram da minha família e pelo incentivo e apoio.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. IMPORTÂNCIA.....	1
1.2. OBJETIVO	2
1.3. JUSTIFICATIVA	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. CALIBRAGEM DE CÂMERAS	7
2.1.1. <i>Métodos de Laboratório</i>	7
2.1.2. <i>Métodos de Campo</i>	8
2.2. MENSURAÇÕES DENDROMÉTRICAS	12
2.2.1. <i>Volumetria</i>	13
2.2.2. <i>Fórmula de Smalian</i>	14
2.2.3. <i>Fórmula de Huber</i>	15
2.2.4. <i>Fórmula de Newton</i>	17
2.2.5. <i>Fórmula de Hossfeld</i>	19
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	22
3.2. MODELO MATEMÁTICO	22
3.2.1. <i>Referencial do "Bitmap"</i>	22
3.2.2. <i>Referencial Fotogramétrico Digital</i>	23
3.2.3. <i>Referencial Fotogramétrico</i>	24
3.2.4. <i>Referencial do Espaço Objeto</i>	25
3.2.5. <i>Modelo Matemático</i>	26
3.2.5.1. <i>Transformação de Coordenadas de "Bitmap" para Fotogramétricas Digitais</i>	26
3.2.5.2. <i>Equações Projetivas</i>	27
3.2.5.3. <i>Distorção Radial Simétrica</i>	29
3.2.5.4. <i>Distorção Descentrada</i>	30
4. RECURSOS UTILIZADOS	36
4.1. CÂMERA UTILIZADA	36
4.2. ALVOS PARA A CALIBRAGEM	37
4.3. PROGRAMAS DE COMPUTAÇÃO UTILIZADOS.....	39
5. CALIBRAGEM DA CÂMERA	40
5.1. TOMADA DAS IMAGENS	40
5.2. LEITURA DAS COORDENADAS DE "BITMAP"	41
5.2.1. <i>Coordenadas dos Alvos com a Objetiva de 55 mm</i>	42

5.2.2.	<i>Coordenadas dos Alvos com a Objetiva de 80 mm</i>	47
5.3.	PROCESSAMENTO DOS DADOS	51
5.4.	RESULTADOS DAS CALIBRAGENS	53
5.4.1.	<i>Dados finais da calibragem da Objetiva de 55mm</i>	53
5.4.2.	<i>Dados finais da Calibragem da Objetiva de 80mm</i>	54
5.5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CALIBRAGEM	55
6.	MENSURAÇÕES DENDROMÉTRICAS COM CÂMERAS DIGITAIS CALIBRADAS	56
6.1.	MEDIDAS ESTÁTICAS	56
6.1.1.	<i>Distâncias</i>	57
6.1.2.	<i>Áreas</i>	57
6.1.3.	<i>Volumes</i>	57
6.2.	MEDIDAS DINÂMICAS	58
6.2.1.	<i>Velocidades</i>	59
6.2.2.	<i>Variações Temporais</i>	59
6.3.	EXPERIÊNCIA EM DENDROMETRIA.....	60
6.3.1.	<i>Coordenadas Obtidas por Intersecção</i>	61
6.3.2.	<i>Experimento 1 – Dentro do Talhão</i>	62
6.3.3.	<i>Experimento 2 – Da borda do Talhão</i>	62
6.3.4.	<i>Experimento 3 – Araucárias</i>	76
6.4.	CUBAGEM DAS ÁRVORES FOTOGRAFADAS	84
6.5.	VOLUME CALCULADO COM MEDIDAS FOTOGRAFAMÉTRICAS DAS ÁRVORES	85
6.5.1.	<i>Comparação Direta do Método Fotogramétrico com o da Cubagem</i> 86	
6.5.2.	<i>Comparação dos Volumes Fotogramétrico Extrapolado com o Cubado</i> 87	
7.	CONCLUSÕES.....	92
7.1.	CONCLUSÕES RELATIVAS A CALIBRAGEM.....	92
7.2.	CONCLUSÕES RELATIVAS À MEDIDAS DENDROMÉTRICAS	93
7.2.1.	<i>Recomendações</i>	95
8.	REFERÊNCIAS.....	96
	ANEXO I – PROCESSAMENTO DA CALIBRAGEM PARA OBJETIVA DE 55mm.....	99
	ANEXO II – PROCESSAMENTO DA CALIBRAGEM PARA OBJETIVA DE 80mm	113
	ANEXO III – OBSERVAÇÕES EXTERNAS AO TALHÃO – Experimento 2 em Dendrometria.....	127
	ANEXO IV – OBSERVAÇÕES DAS ARAUCÁRIAS – Experimento 3 em Dendrometria	134

LISTA DE FIGURAS

2.1 Árvore abatida, com posições onde efetua-se as medições conforme procedimento de Smalian.....	14
2.2 Árvore abatida com procedimentos de medições conforme o método de Huber.....	16
2.3 Árvore abatida, com as posições, onde efetua-se medições, conforme procedimento de Newton.....	18
2.4 Esquema para medições conforme procedimento de Hossfeld.....	19
3.1 Referencial do “Bitmap”.....	23
3.2 Referencial Fotogramétrico Digital.....	24
3.3 Referencial Fotogramétrico.....	25
3.4 Referencial do Espaço Objeto.....	26
3.5 Transformação de Coordenadas de “Bitmap” para Fotogramétricas Digitais.....	27
4.1 Imagem do Campo de Calibragem.....	38
4.2 Os Tipos de Alvo.....	38
5.1 Esquema das Tomadas de Imagens.....	40
5.2 Gráfico de Distorção Radial Simétrica para a objetiva de 55mm.....	53
5.3 Gráfico de Distorção Radial Simétrica para a objetiva de 55mm.....	54
6.1 Imagem 32 – Experimento 2 – Pinus.....	63
6.2 Imagem 38 – Experimento 2 – Pinus.....	63
6.3 Imagem 41 – Experimento 2 – Pinus.....	64
6.4 Restituição do Experimento 2 – Pinus.....	69
6.5 Imagem 47 – Experimento 3 – Araucárias.....	77
6.6 Imagem 52 – Experimento 3 – Araucárias.....	77
6.7 Imagem 47 – Experimento 3 – Araucárias.....	78
6.8 Restituição do Experimento 3 – Araucárias.....	81

LISTA DE TABELAS

5.1 Coordenadas da Imagem 3.....	43
5.2 Coordenadas da Imagem 5.....	44
5.3 Coordenadas da Imagem 11.....	45
5.4 Coordenadas da Imagem 15.....	46
5.5 Coordenadas da Imagem 19.....	47
5.6 Coordenadas da Imagem 23.....	48
5.7 Coordenadas da Imagem 27.....	49
5.8 Coordenadas da Imagem 31.....	50
6.1 Coordenadas da Imagem 32.....	65
6.2 Coordenadas da Imagem 38.....	66
6.3 Coordenadas da Imagem 41.....	67
6.4 Posições e Atitudes da Câmera.....	67
6.5 Posições e Atitudes da Câmera.....	68
6.6 Cálculo de Volume Relativo a Árvore S (Método Fotogramétrico).....	70
6.7 Cálculo de Volume Relativo a Árvore R (Método Fotogramétrico).....	71
6.8 Cálculo de Volume Relativo a Árvore Q (Método Fotogramétrico).....	71
6.9 Cálculo de Volume Relativo a Árvore P (Método Fotogramétrico).....	72
6.10 Cálculo de Volume Relativo a Árvore U (Método Fotogramétrico).....	72
6.11 Cálculo de Volume Relativo a Árvore T (Método Fotogramétrico).....	73
6.12 Cálculo de Volume Relativo a Árvore V (Método Fotogramétrico).....	73
6.13 Cálculo de Volume Relativo a Árvore W (Método Fotogramétrico).....	74
6.14 Cálculo de Volume Relativo a Árvore X (Método Fotogramétrico).....	74
6.15 Cálculo de Volume Relativo a Árvore Q (Método de Huber).....	75
6.16 Cálculo de Volume Relativo a Árvore P (Método de Huber).....	75
6.17 Cálculo de Volume Relativo a Árvore U (Método de Huber).....	76
6.18 Coordenadas da Imagem 47.....	79
6.19 Coordenadas da Imagem 57.....	79
6.20 Coordenadas da Imagem 52.....	79
6.21 Posições e Atitudes da Câmera.....	80
6.22 Posições e Atitudes da Câmera.....	80

6.23 Cálculo de Volume Relativo a Árvore 1 (Método Fotogramétrico).....	82
6.24 Cálculo de Volume Relativo a Árvore 2 (Método Fotogramétrico).....	83
6.25 Cálculo de Volume Relativo a Árvore 3 (Método Fotogramétrico).....	83
6.26 Cálculo de Volume Relativo a Árvore 4 (Método Fotogramétrico).....	84
6.27 Cálculo de Volume Relativo a Árvore P (Método de Huber).....	89
6.28 Cálculo de Volume Relativo a Árvore Q (Método de Huber).....	90
6.29 Cálculo de Volume Relativo a Árvore U (Método de Huber).....	91

RESUMO

Esta pesquisa traz dois aspectos de fundamental importância para o uso da metodologia da fotogrametria analítica em projetos do campo florestal. O primeiro foi o uso do método das câmeras convergentes através de um processo “on line” de medida de coordenadas, com o processamento da calibragem por feixes de raios homólogos ajustados simultaneamente, onde o referencial fotogramétrico digital é definido em substituição ao referencial fiducial. Essa metodologia, aplicada a calibragem de câmeras digitais trouxe à tona facilidades enormes ainda não experimentadas. O segundo aspecto, refere-se ao uso da mesma tecnologia desenvolvida para executar a calibragem das objetivas de uma câmera digital, para a obtenção de coordenadas de pontos do espaço objeto, que permitem a determinação de todos os valores geométricos que se pode derivar de um conjunto de pontos no espaço. A fototriangulação de três fotografias exigiu, como única mensuração no campo, uma distância. A posição e atitude da câmera ao tomar uma das imagens foi injuncionada arbitrariamente, materializando, assim, o referencial do espaço objeto. As duas outras posições e atitudes da câmera, ao tomar as outras duas imagens, foram ajustadas aos dados pelo Método dos Mínimos Quadrados aplicado ao “Bundle Method”. De um par de imagens escolhido, um estereo modelo foi confeccionado e cada uma das árvores de interesse foi compilada numa estação fotogramétrica digital. Com os recursos de um CAD, os diâmetros de diversas seções transversais ao longo do fuste das árvores, em distâncias prescritas, foram medidas, o que permitiu o cálculo do volume da árvore.

ABSTRACT

This research shows two aspects of paramount importance to the use of analytical photogrammetry methodology in the field of Forestry Science. The first was the use of the Convergent Camera Method to calibrate cameras. This method was revised and adopted in a process of on line measurement of photo coordinates with processing camera calibration by Bundle Method, where the digital photogrammetric reference frame is defined replacing the traditional fiducial reference frame. This methodology to calibrate digital cameras, brought up ways to easily solve photogrammetric problems, not yet experimented. The second aspect refers to the use of the same technology developed to calibrate digital camera lenses, to get space coordinates of points, to allow the computation of all the geometric values that one can derive from a set of points in the space. The phototriangulation of the three photographs was performed by the Bundle Method, arbitrarily fixing the position and attitude of the camera when taking one of the images and measuring at least one distance between two measured points to materialize an object reference frame. A stereo model was made out of the three images, and each of the trees of interest was compiled in an photogrammetric digital station. Using the recourses of a CAD, the diameters of many cross sections along of prescribed distances according to a very well know technology along each of the trees of interest were measured, allowing the computation of the volume of the tree.

1. INTRODUÇÃO

A associação de câmeras digitais de pequeno formato com a metodologia da fotogrametria analítica e dos computadores pessoais acrescentou inúmeras qualidades nas medições realizadas através da fotogrametria a curta distância. Tais qualidades, ganhas pelo desenvolvimento tecnológico alcançado em nossos dias, potencializou a realização de tarefas que, quando possíveis de realizar, a relação custo/benefício era tão alta que inviabilizava os procedimentos fotogramétricos.

Por isso, torna-se necessário estabelecer novas sistemáticas e tecnologias, fáceis e rápidas para realizar, para que seja promovido o ganho tecnológico potencialmente disponível.

1.1. IMPORTÂNCIA

Sempre existiu nas Ciências Florestais uma grande demanda por maior precisão, integridade e rápida disponibilidade de dados que permitam a avaliação com controle estatístico de qualidade de parâmetros geométricos ligados à árvore, como por exemplo, o seu volume.

As câmeras digitais estão mostrando uma série de vantagens sobre as câmeras tradicionais com filme, por razões muito importantes como: facilidade de manipulação das imagens em computadores; possibilidade de registrar imagens na região do infravermelho, sem necessidade de cuidados especiais que os filmes para esse fim exigem; possuir um referencial intrínseco semelhante a um “reseau” de discriminação igual ao da própria imagem, no caso, de 15 micrômetros. Naturalmente não

há o grande problema do trabalho do filme. O uso do “bitmap” como “reseau” definidor do referencial fotogramétrico que aqui denominaremos de Referencial Fotogramétrico Digital é um dos resultados importantes deste trabalho e será minuciosamente descrito no item 3.

Em qualquer tipo de resultado que se obtenha através da metodologia demonstrada, sempre será possível a propagação das variâncias em virtude da superabundância das observações ou do conhecimento anterior das mesmas.

1.2. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi propor e testar metodologia confiável com métodos fotogramétricos, com o uso de câmeras digitais de pequeno formato em mensurações na área da Engenharia Florestal e estabelecer os procedimentos técnicos para executar com sucesso os trabalhos fotogramétricos.

1.3. JUSTIFICATIVA

É de primordial importância, para garantir o sucesso de qualquer processo de mensuração, ter os erros sistemáticos controlados. A calibragem de instrumentos, como é conceituada modernamente, jamais pode ser deixada de lado quando o objetivo é garantir bons resultados naquilo que se mede. Só instrumentos calibrados permitem a obtenção de resultados isentos dos erros sistemáticos advindos do instrumental utilizado, com o adequado controle estatístico, ou seja, com a determinação de avaliadores da qualidade dos resultados. EISENHART (1963) definiu

calibragem de instrumentos e padrões como uma forma refinada de mensuração, cujos princípios são:

- “1 – o método de mensuração deve ser completamente definido;
- 2 – as mensurações devem ter um estado de controle estatístico; e,
- 3 – o método de calibragem deve ser tão próximo quanto possível das condições normais de uso do instrumento, ou seja, deve ser calibrado o sistema de mensuração”.

Assim, a calibragem da câmera merecerá a maior prioridade possível, pois tudo o que vier a seguir será consequência direta do grau de sucesso desta fase.

Os procedimentos de mensuração foram baseados na determinação de coordenadas de pontos definidores de uma figura qualquer, determinados por processos fotogramétricos com a avaliação da respectiva variância. Esta será propagada para o valor da grandeza geométrica determinada, seja área, volume, distância, ângulo ou outra qualquer, de forma que as incertezas nessas determinações sejam totalmente conhecidas, dando ênfase à volumetria.

A economia e a tecnologia da atualidade requerem o máximo rigor nas mensurações, ao lado de maior generalidade, precisão, controle estatístico e grau de automação. Já não é mais possível viver com avaliações ligeiras sem sofrer o impacto da concorrência globalizada. Não obstante, mesmo sendo muito mais rigorosos, os métodos de mensuração não podem perder a sua aplicabilidade em virtude de custos muito altos ou de tempo longo de observação.

Os Métodos da Fotogrametria Digital – como explicitado por ANDRADE (1999), oferecem a possibilidade do atendimento do acima estabelecido em virtude do seu potencial de aceitação da matemática. Os métodos podem ser criados visando automação e, assim, flexibilidade, velocidade e elevado grau de precisão.

Calibrar a câmera com sucesso é a base de todo o procedimento planejado, pois permitirá o desenvolvimento de outras tarefas buscando a maior generalidade possível, para que a sua aplicabilidade abranja o máximo do que se mede em Engenharia Florestal.

Desta forma, foram desenvolvidos os procedimentos de obtenção de valores métricos, a partir de coordenadas espaciais de pontos. Tais valores métricos poderão ser, por exemplo, distâncias, áreas, volumes e as suas variações temporais. Isto transfere-se automaticamente para qualquer área específica da Engenharia Florestal onde mensurações são efetivadas, tais como manejo florestal, dendrometria, topografia, tecnologia da madeira etc.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A dissertação envolve a solução de dois problemas: a calibragem de câmeras fotográficas digitais e a da mensuração de parâmetros de árvores a partir de imagens obtidas com tais câmeras.

Tanto a calibragem de câmeras fotogramétricas quanto a Dendrometria possuem tecnologia muito bem conhecidas, bem assentadas sob o ponto de vista teórico e tecnológico. Entretanto, a demanda da área florestal por métodos e processos com as características de rapidez, economia e qualidade geométrica está sendo cada vez maior.

Uma câmera para ser considerada fotogramétrica tem que possuir determinadas características mínimas, como soma das distorções radial simétrica e descentrada inferior a 10 micrômetros, possuir um mínimo de quatro marcas fiduciais ou um “reseau”, ter a focalização fixa para o infinito, a fim de manter constante a geometria do feixe perspectivo. Ver MERCHANT(1979 e 1980) e BENDER(1971).

Embora câmeras de pequeno formato tenham sido construídas com marcas fiduciais ou “reseau”, ou tais elementos tenham sido acrescentados a ela num processo de adaptação, não podem, só por isso, ser denominadas de câmeras métricas. Mesmo assim, poucos países, como Estados Unidos da América, Canadá, Brasil e Alemanha realizaram experiências com sucesso para o uso de câmeras de pequeno formato, na tecnologia que passou a ser conhecida como de Fotogrametria a Curta Distância, encontrando aplicações nas áreas da indústria, para controle de qualidade geométrica, e de arquitetura para o cadastro de monumentos ou para a reconstituição de edificações consideradas como de elevado valor arquitetônico.

As câmeras digitais não são fotogramétricas, pois não possuem marcas fiduciais, nem “reseau” e apresentam distorções ópticas

muito grandes, ou seja, acima de 10 micrômetros, o que as colocam fora da definição do que é considerado uma câmera fotogramétrica (BENDER, 1970).

Por outro lado, as inúmeras vantagens oferecidas pelas câmeras digitais já existentes no mercado, convidam ao seu aproveitamento nas áreas que requerem tecnologia melhorada. Tais vantagens envolvem a sensibilidade a um espectro mais largo de frequência de ondas eletromagnéticas, variando desde o azul até o infravermelho próximo e deixando de ter todos os problemas que a manipulação de filmes exige, tais como revelação, copiagem, cuidados que os filmes sensíveis ao infravermelho exigem e o trabalho do filme. O tratamento da imagem digital é muito mais efetiva do que qualquer tratamento da imagem analógica, pois uma vez revelado o filme, muito pouco é possível fazer para melhorá-la.

O uso das câmeras digitais, por isso, requer inovações nos métodos de calibração, quais sejam: o estabelecimento de um referencial confiável para a imagem e uma metodologia que permita o uso da câmera para qualquer focalização. Nas aplicações do presente trabalho todas as imagens serão tomadas com os objetos situados a uma distância tal, que a câmera estará focalizada para o infinito como valor constante, não havendo, por isso, necessidade de que a calibragem atenda a outras focalizações.

Com relação às medidas dendrométricas, o uso de imagens digitais tomadas com câmeras digitais calibradas, apresentam muitos aspectos favoráveis à obtenção de resultados melhores quanto a precisão, que serão descritos a seguir.

Os pontos de uma fototriangulação que resultarem com resíduos muito altos, poderão de novo ser medidos imediatamente no mesmo computador onde se processa a mesma.

Coordenadas de pontos definidores da forma da árvore podem ser medidas. Na verdade uma árvore pode ser quase que totalmente restituída numa estação fotogramétrica digital. Portanto, com as câmeras digitais é possível ter-se em mãos a maior quantidade de informações sobre cada árvore em particular. Além disso, um conjunto de árvores pode ser levantado simultaneamente.

2.1. CALIBRAGEM DE CÂMERAS

A determinação dos valores numéricos dos parâmetros adotados nos modelos matemáticos com controle estatístico da qualidade, é o que se denomina de calibragem de instrumentos, segundo o conceito formulado por EISENHART (1963). Esta definição muito clara e bem fundamentada tem sido seguida desde a data de sua publicação, pois vincula a calibragem com o sistema de mensuração.

MERCHANT (1980), por sua vez, conceituou o sistema de mensuração como sendo o conjunto de instrumentos, métodos e modelos matemáticos envolvidos no processo de mensuração.

Esses dois conceitos conduzem à obtenção de resultados com controle estatístico nos processos de mensuração, permitindo o conhecimento dos valores procurados, bem como o seu grau de confiabilidade. Ao lado desses fatos, tais princípios permitem conseguir os melhores valores que um sistema de mensuração pode oferecer. É fácil concluir que em qualquer processo de mensuração, a calibragem dos instrumentos é mais do que desejável, é na verdade o pré-requisito para a obtenção de valores confiáveis.

Os métodos desenvolvidos para a calibragem de câmeras são inúmeros. Muitos caíram em desuso em virtude de suas dificuldades operacionais. Mesmo assim, podem ser classificados segundo o grupo de parâmetros que podem tratar em virtude da sua metodologia e modelo matemático. Esta classificação envolve, coincidentemente, os meios de realizar a calibragem e divide os métodos de calibragem das câmeras em métodos de laboratório e métodos de campo.

2.1.1. Métodos de Laboratório

Os métodos de laboratório são dois, que podem apresentar pequenas variantes em virtude do equipamento utilizado.

Estes métodos nasceram da própria necessidade dos fabricantes de objetivas em poder determinar a qualidade, a uniformidade e a conformidade dos equipamentos fabricados. Assim, primariamente os métodos de calibragem foram desenvolvidos para permitir o acesso à qualidade ótica dos componentes de uma câmera. E, de princípio, um certificado demonstrando tais qualidades, passa a ser desejável para os adquirentes de tais equipamentos, como garantia de que possuem um instrumento bem construído para a realização dos seus trabalhos.

De acordo com MERCHANT (1980), o primeiro método principal de laboratório para calibrar câmeras fotogramétricas usa um goniômetro ótico e é denominado de método visual de calibragem. O método visual é utilizado por:

- Wild (hoje LEICA) of Heerbrugg, na Suíça
- Zeiss, na Alemanha
- Universidade Técnica, na Finlândia.

O segundo principal método de laboratório (MERCHANT, 1980) para a calibragem de câmeras métricas é o método fotográfico, que usa bancos de colimadores óticos. O método fotográfico tem sido usado por:

- National Reserch Council (NRC), no Canadá
- U. S. Geological Survey.

Os métodos de laboratório não incluem em seus modelos matemáticos a distorção descentrada, que é eliminada quando é calculada a média dos valores de distorção radial simétrica, determinados ao longo de diversas radiais. Os valores de tais distorções ficam conhecidos ao longo das radiais (quatro), pela diferença entre os valores da distorção radial simétrica média e a medida, ou seja, uma espécie de resíduo, que deve resultar inferior a um valor pré-estabelecido para que a montagem das objetivas possa ser considerada boa.

2.1.2. Métodos de Campo

São muitos os métodos de campo. Alguns métodos de campo foram criados antes de Eisenhart haver estabelecido o conceito moderno de

calibragem de instrumentos. Procurava-se um aperfeiçoamento para os métodos de laboratório, no sentido de aumentar a área de um fotograma participante do processo de calibragem.

Os catálogos de estrelas proporcionavam as coordenadas uranográficas de uma quantidade enorme de estrelas, com erro inferior a um segundo de arco. Desta forma, a abóboda celeste passou a ser considerada como um excelente campo de teste para a calibragem de câmeras. Como o modelo matemático adequado para equacionar o feixe perspectivo com a direção das estrelas poderia incluir a distorção descentrada, esta passou a ser considerada.

O procedimento da calibragem estelar está descrita em ANDRADE (1999) e em SOLER (1971). Soler descreve minuciosamente, como realizar a atualização precisa das coordenadas uranográficas das estrelas para a época da tomada de fotos, incluindo programas computacionais para tanto, bem como para o cálculo da calibragem. DUANE BROWN (1964) foi quem desenvolveu algoritmos avançados para a calibragem de câmeras fotogramétricas para métodos estelares, levando em consideração a distorção descentrada. Na verdade, tais algoritmos são os mesmos utilizados até os nossos dias, pois, em seus parâmetros, garantem o nível de exatidão da ordem do micrometro.

Esse método de calibragem sofreu grande impulso nos Estados Unidos da América no início da era espacial, quando os meios mais utilizados para a observação de satélites artificiais para fins geodésicos eram as câmeras balísticas. A calibragem de câmeras balísticas para o rastreo de satélites artificiais propiciou também o desenvolvimento do uso de câmeras fotogramétricas para melhorar os catálogos estelares com relação ao número de estrelas, principalmente no hemisfério sul. A Alemanha, através da Universidade de Hannover, desenvolveu procedimentos para a determinação de coordenadas astronômicas de pontos da superfície da Terra, com câmeras orientadas para o zênite – a direção do zênite vem a ser a latitude e longitude do lugar.

Para finalidades ligadas a cartografia, entretanto, o método estelar mostrava-se não adequado, por ser o processo de calibragem realizado em condições totalmente diferentes dos métodos da aerofotogrametria. Nos métodos fotogramétricos, as imagens são tomadas durante o dia e em ótimas condições de luminosidade; as câmeras têm o seus eixos óticos orientados para o nadir; as imagens são tomadas em cadência para garantir a superposição desejada das imagens; e de bordo de uma aeronave em voo, sofrendo, portanto, os movimentos bruscos causados pela sua instabilidade. Assim, a busca de métodos mais adequados para a Fotogrametria prosseguiu.

MERCHANT (1971), analisou os métodos “Off Wing”, e esquemas com injunções para a posição da câmera. Com isso acabou criando o Método Tridimensional (Campos Mistos) que, pelo desenvolvimento do método, recebeu o Prêmio Talbot da American Society of Photogrammetry (ASP).

Esse método foi alvo de pesquisas por parte de Dean C. Merchant e José Bittencourt de Andrade, no sentido de poder utilizar apoio de campo mais fácil. Para tanto, simularam o método em computador, demonstrando que apenas com uma distância e os desníveis entre alvos conhecidos, o método funciona perfeitamente. Uma experiência foi realizada no Campus da The Ohio State University em 1977, comprovando a metodologia na prática. Nessa época, Andrade já havia simulado outro tipo de controle muito fácil de levantar as distâncias, em virtude do desenvolvimento ocorrido nesta área na década de 60.

ANDRADE et al. (1981) com seus auxiliares, construiu um campo de testes para calibragem na Serra de São Luiz do Purunã, em Campo Largo, onde foram colocados alvos retangulares, com centros circulares, em contraste preto e branco. Com essas facilidades as câmeras têm sido calibradas no Brasil, pelo método Tridimensional (Campos Misturados) de Dean Merchant, desde 1981.

ANDRADE (1999) conta em seu livro que um defeito ocorrido na câmera fotogramétrica à bordo da espaçonave APOLO 14, que teria que

fotografar regiões da lua para posterior mapeamento, a fim de facilitar futuras descidas em nosso satélite natural, fez com que os astronautas tomassem as fotos com uma HASSELBLAD 500, não calibrada, mas com "reseau". A NASA contratou DBA Systems, empresa de Duane Brown, para tentar calibrar a câmera com fotos tomadas com a mesma. Havia fotografias convergentes e também fotos giradas de 90^0 em relação ao eixo ótico. Isto deu condições para quebrar a dependência linear entre os parâmetros de fototriangulação que Merchant mostrou haver nas fotografias aéreas. Desta forma, o gênio de Duane Brown criou, por encomenda, um novo método de calibração de câmeras.

Entretanto, o método das câmeras convergentes de Duane Brown não era adequado para a aerofotogrametria, por exigir fotos altamente convergentes. O problema de fotos muito convergentes, cerca de 45^0 , está em que é extremamente difícil corrigir refração em fotos não verticais. Para Fotogrametria a Curta Distância, contudo, o efeito da refração fotogramétrica é desprezível, ou seja, é inferior a precisão das medidas de coordenadas fotogramétricas e por isto o método mostrou-se muito adequado para esse fim.

No Brasil, o Professor Bittencourt de Andrade calibrou uma câmera ROLLEI-SLX Reseau Camera. O Prof. H. P. Bähr determinou, para a mesma câmera, a Função de Transferência de Modulação, num trabalho que apresentaram no Simpósio Internacional da Comissão I da Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, ocorrido em Camberra, na Austrália – ANDRADE et al. (1982). Mais tarde ANDRADE (1995) et al. calibrou com o Prof. Magro da UFRGS uma Câmera de Video S-VHS. Nos dois casos, o método utilizado foi o das Câmeras Convergentes de Duane Brown.

2.2. MENSURAÇÕES DENDROMÉTRICAS

Para ser efetuado qualquer planejamento ou manejo florestal adequado, são necessárias informações quantitativas e qualitativas da floresta ou do povoamento. Para tanto, é necessário o conhecimento dos métodos de quantificar área basal, volume e peso de várias árvores individuais ou em povoamentos florestais. Depois de ter quantificado a característica de interesse é possível acompanhar o seu desenvolvimento e fazer inferências sobre a população florestal. Ainda é possível desenvolver equações de volume e peso do povoamento; classificar localidades conforme sua produtividade, grau de ocupação, estimativas presente e futuras de volume e peso, sortimentos por unidade de área ou por classe de diâmetro e estudos sobre produção e rendimento das populações florestais entre outras .

Portanto quantificar e medir é de fundamental importância nas Ciências Florestais.

O objetivo da dendrometria é obter informações da floresta ou parte dela, de modo a prever a produção presente e também efetuar a predição futura do crescimento e da produção, elementos fundamentais para manejo florestal (PHILIP, 1994).

Nas medições efetuadas nas florestas existem erros que podem ser classificados como:

- Erros sistemáticos – são devidos ao uso de instrumentos não calibrados, a metodologia de mensuração e a modelos matemáticos errados.
- Erros aleatórios – não são vinculados a nenhuma causa conhecida. Obedecem a lei dos grandes números e são associados a uma probabilidade.
- Erros grosseiros – são enganos, como digitação errada, por exemplo.

Para maiores detalhes, veja GEMAEL (1994).

Existem ainda dois tipos de medições:

- Medições diretas – efetuadas diretamente sobre as próprias grandezas incógnitas. Exemplos: diâmetros na altura de peito de uma árvore.
- Medições indiretas – são obtidas através de relações funcionais que ligam as grandezas procuradas, geralmente denominadas de parâmetros, àquelas que são observadas. Exemplo: volume de uma árvore, como função de diâmetros e alturas observados. Para maiores detalhes, veja GEMAEL (1994).

2.2.1. Volumetria

Serão feitas algumas considerações sobre métodos de quantificar volumes, com as quais é possível obter equações de volume, fator de forma e equações de forma.

O volume das árvores pode ser calculado através dos seguintes métodos:

- Deslocamento de água
- Peso
- Cubagem através de fórmulas específicas
- Método Gráfico

Como o assunto é muito extenso, neste trabalho estão referenciados apenas os métodos de cubagem com fórmulas específicas.

Os principais métodos de cubagem com fórmulas específicas são os seguintes: Smalian, Huber, Newton e Hossfeld (HUSCH et al., 1982).

2.2.2. Fórmula de Smalian

O volume é obtido, pelo produto, da média aritmética das áreas seccionais dos extremos da seção, pelo seu comprimento (CHAPMAN et al., 1949) e (AVERY et al., 1983). PRODAN et al. (1997), diz que a fórmula de SMALIAN foi desenvolvida em 1804.

$$V = \left(\frac{g_i + g_{i+1}}{2} \right) L \quad (2.1)$$

onde:

V= volume da seção considerada

g_i = área seccional do extremo da seção

g_{i+1} = área seccional do outro extremo da seção

L = comprimento da seção

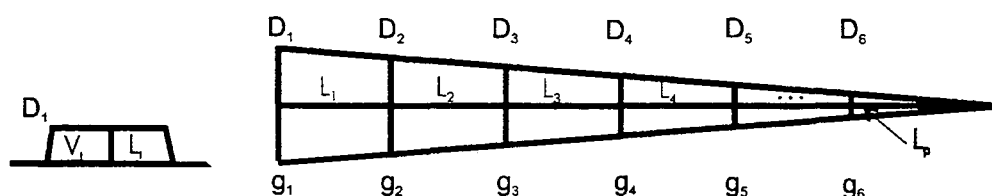


Figura 2.1 – Árvore abatida, com as posições onde efetua-se as medições conforme procedimento de Smalian.

onde:

D_i = diâmetros tomados nos extremos das seções

L_i = comprimento das seções

L_t = altura do toco

L_p = comprimento da ponta

g_i = áreas seccionais dos extremos das seções

V_i = volume das seções

V_t = volume do toco (calculado como cilindro)

V_p = volume da ponta (calculado como volume do cone)

Cálculo de volumes:

$$V_1 = \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right) \cdot L_1 \quad (2.2)$$

$$V_2 = \left(\frac{g_2 + g_3}{2} \right) \cdot L_2 \quad (2.3)$$

⋮

$$V_i = \left(\frac{g_i + g_{i+1}}{2} \right) \cdot L_i \quad (2.4)$$

$$V_t = g_t L_t \quad (2.5)$$

$$V_p = \frac{1}{3} g_6 L_p \quad (2.6)$$

Volume total da árvore:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_t + V_p \quad (2.7)$$

Volume da árvore, exclusive o toco:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_p \quad (2.8)$$

Volume da árvore, exclusive o toco e a ponta:

$$V = V_1 + V_2 + V_{3+} + V_4 + V_5 \quad (2.9)$$

2.2.3. Fórmula de Huber

O volume pela fórmula de HUBER, desenvolvida em 1828 segundo descreve PRODAN et al. (1997), é obtido pelo produto da área seccional tomada na metade da seção e o comprimento da seção (CHAPMAN et al., 1949) e (AVERY et al., 1983).

$$V = g_i \cdot L \quad (2.10)$$

onde:

V = volume da seção

g_i = área seccional tomada no meio da seção

L = comprimento da seção

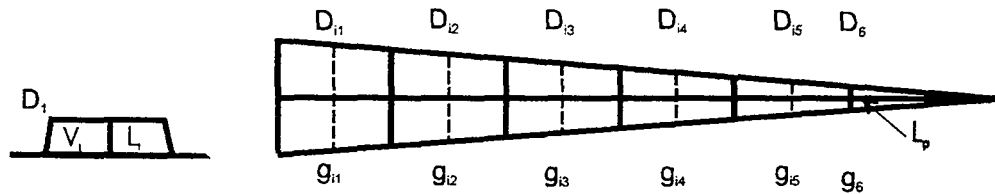


Figura 2.2 - Árvore abatida com procedimentos de medições conforme o método de Huber.

Onde:

D_i = diâmetro da metade da seção i

D_t = diâmetro do toco

D_6 = diâmetro da base do cone

g_i = área seccional da metade da seção i

g_t = área seccional do toco

g_6 = área seccional da base do cone

L_i = comprimento da seção i

L_t = comprimento do toco

L_p = comprimento da ponta

V_i = volume da seção i

V_t = volume do toco (calculado como volume do cilindro)

V_p = volume da ponta (calculado como volume do cone)

Cálculo de volumes:

$$V_T = g_t \cdot L_t \quad (2.11)$$

$$V_1 = g_{i1} \cdot L_1 \quad (2.12)$$

$$V_2 = g_{i2} \cdot L_2 \quad (2.13)$$

$$V_3 = g_{i3} \cdot L_3 \quad (2.14)$$

$$V_4 = g_{i4} \cdot L_4 \quad (2.15)$$

$$V_5 = g_{i5} \cdot L_5 \quad (2.16)$$

$$V_p = \frac{1}{3} g_6 \cdot L_p \quad (2.17)$$

Volume total da árvore:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_t + V_p \quad (2.18)$$

Volume da árvore, exclusive o toco:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_p \quad (2.19)$$

Volume da árvore, exclusive o toco e a ponta:

$$V = V_1 + V_2 + V_{3+} + V_4 + V_5 \quad (2.20)$$

2.2.4. Fórmula de Newton

O volume calculado é obtido da seguinte maneira (CHAPMAN et al., 1949) e (AVERY et al., 1983):

$$V = \left(\frac{g_i + 4g_{int} + g_{i+1}}{6} \right) \cdot L \quad (2.21)$$

onde:

V = volume da seção i

g_i = área seccional do extremo da seção

g_{i+1} = área seccional do outro extremo da seção

g_{int} = área seccional da metade da seção

L = comprimento da seção

Esta fórmula foi desenvolvida por ISAAC NEWTON e utilizada para a mensuração florestal, a partir de 1849, por RIECKE, conforme mostra PRODAN et al. (1997).

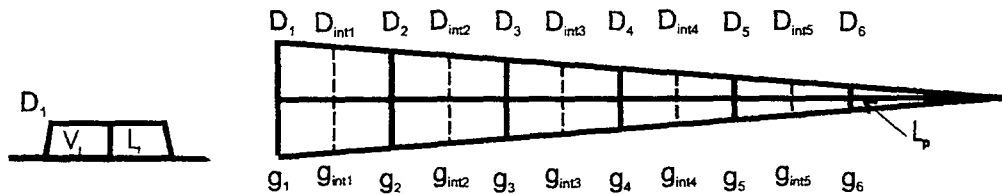


Figura 2.3.- Árvore abatida, com as posições, onde efetua-se medições, conforme procedimento de Newton.

Calculo de volumes:

$$V = \left(\frac{g_1 + 4g_{int1} + g_2}{6} \right) \cdot L_1 \quad (2.22)$$

$$V = \left(\frac{g_2 + 4g_{int2} + g_3}{6} \right) \cdot L_2 \quad (2.23)$$

⋮

$$V = \left(\frac{g_i + 4g_{int} + g_{i+1}}{6} \right) \cdot L \quad (2.24)$$

Volume total da árvore:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_t + V_p \quad (2.25)$$

Volume da árvore, exclusive o toco:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_p \quad (2.26)$$

Volume da árvore, exclusive o toco e a ponta:

$$V = V_t + V_2 + V_{3+} + V_4 + V_5 \quad (2.27)$$

2.2.5. Fórmula de Hossfeld

A fórmula de Hossfeld, desenvolvida em 1849, conforme PRODAN et al. (1997) é a mais simples entre as abordadas para a cubagem rigorosa. Não existe a necessidade de seccionar a árvore. O volume é obtido a partir do diâmetro tomado a 1/3 da altura total da árvore.

$$V = \frac{3}{4} . g . H \quad (2.28)$$

onde:

H = altura da árvore

g = área seccional é obtida a partir do diâmetro tomado a 1/3 da altura da árvore

$$g = \frac{\pi . D^2 . \left(\frac{1}{3} H \right)}{4} \quad (2.29)$$

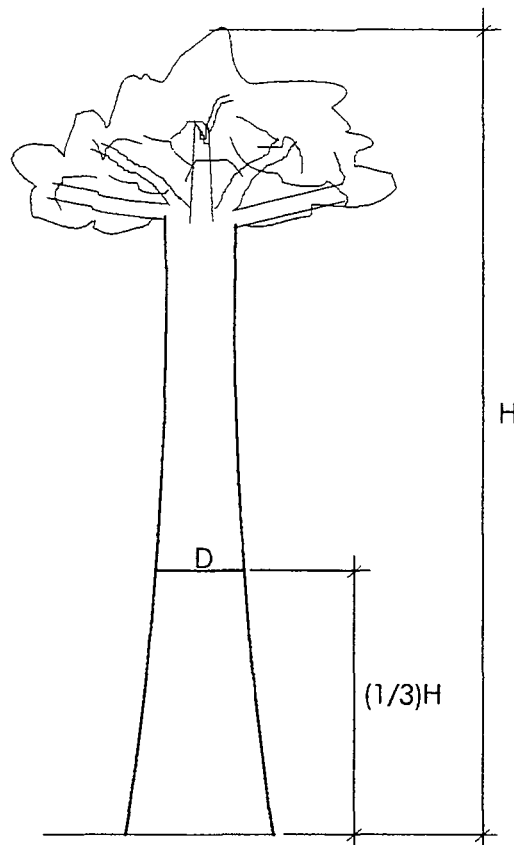


Figura 2.4.- Esquema para medições conforme procedimento de Hossfeld.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Qualquer trabalho que envolva mensurações de precisão exige o uso de equipamentos calibrados e de tecnologia adequada. Assim o primeiro passo neste trabalho foi a calibragem da câmera.

A câmera disponibilizada foi uma MAMYIA 645 PRO. As suas características técnicas encontram-se no item 4.1.

A calibragem foi realizada pelo Método das **Câmeras Convergentes**, desenvolvido por BROWN (1969) – um método muito elegante e bem adequado para câmeras de pequeno formato destinadas a Fotogrametria a Curta Distância.

Foram obtidas imagens com duas objetivas diferentes – 55mm e 80mm de distância focal nominal.

Para cada objetiva, foram tomadas fotos com duas aberturas diferentes – $f/4$ e $f/5.6$. Um total de 32 imagens foram feitas da esquerda, do centro e da direita em relação aos alvos, de modo que todos aparecessem em cada foto. As imagens da esquerda e da direita foram tomadas de modo que os eixos ópticos formassem ângulo de convergência de 45° em relação as fotos tomadas da posição central. As imagens centrais foram feitas com o eixo óptico da câmera perpendicular a parede e giradas de 90° ao seu redor. Foram medidas, com todo o rigor, duas distâncias entre dois alvos com auxílio de uma trena metálica. As coordenadas de todos os alvos foram medidas, também com trena metálica, sem muitos cuidados, para determinar seus valores aproximados, num referencial arbitrário materializado na própria parede como plano **XY** e o eixo **Z** formando com os anteriores um sistema dextrógiro. Os programas computacionais para processar esses dados exigem sistemas de referência dextrógiro, como de resto ocorre com a quase totalidade dos programas fotogramétricos.

As leituras de coordenadas fotogramétricas das imagens foram realizadas no referencial definido pelos “bitmaps” das imagens, segundo a descrição em 3.2.1., com auxílio do software Micrografx Picture Publisher (copyright da Microsoft [T.M.]).

Para a calibragem das duas objetivas – 80mm e 55mm da câmera MAMYIA 645 PRO foi utilizado o programa computacional comercial GeoCali-2000 ©, da empresa GEOKOSMOS.

A segunda etapa da pesquisa consistiu em desenvolver tecnologia para a determinação de grandezas geométricas tais como distâncias, áreas, volumes, velocidades, deformações, bem como as variações temporais destas grandezas, a partir de coordenadas espaciais de pontos determinados por fotogrametria. Todos os métodos foram desenvolvidos para oferecer adequado controle estatístico da qualidade das mensurações obtidas.

Experiências demonstrativas foram realizadas, com o uso da câmera já calibrada, com fotografias convergentes. O método desenvolvido baseia-se em pares de fotos convergentes do objeto da mensuração. Nessas imagens foram medidas as coordenadas fotogramétricas dos pontos em quantidade e localização adequados para uma fototriangulação.

A partir do resultado da fototriangulação de três imagens foi montado um modelo estereoscópico com duas imagens escolhidas, o que permitiu o uso da estação de restituição digital. Na estação de restituição digital, os fustes das árvores de interesse foram compilados em três dimensões, com o CAD MicroStation © da BENTLEY™. Com o mesmo CAD, as seções de cada árvore foram locadas e medidos os diâmetros. A partir destes dados, o volume de cada árvore de interesse pôde ser calculado.

Este procedimento, por ser completamente geral, é aplicável a qualquer problema de mensuração de objetos passíveis de ser imageados.

3.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

As fotos para calibrar a câmera foram tomadas de uma parede vertical guarnecida de cerâmica, onde os alvos foram pintados. Trata-se da parede norte do bloco VI do Centro Politécnico da UFPR, em Curitiba, Paraná.

A segunda fase da pesquisa, onde foram fotografadas as árvores, foi realizada na Fazenda Experimental Canguiri, da UFPR, situada no município de Piraquara, Paraná.

3.2. MODELO MATEMÁTICO

A modelagem matemática utilizada para relacionar coordenadas de pontos do espaço objeto com as suas correspondentes imagens é exatamente a mesma utilizada na fotogrametria aérea. Apenas os referenciais fotogramétrico e do espaço objeto serão, neste trabalho, objeto de definição especial, com o objetivo de facilitar todos os procedimentos.

3.2.1. Referencial do "Bitmap"

No "bitmap", cada pixel (número que designa o tom de cor representada) tem a sua posição definida numa matriz pela coluna e linha a que pertence. Portanto, as suas coordenadas não são registradas em valores numéricos, sendo intrínsecas em razão da posição do pixel no "bitmap". Na convenção usual, as colunas são designadas desde 0 até C, da esquerda para a direita, e em seguida designa-se a linha, desde 0 – a linha superior até L – a linha inferior no "bitmap".

Assim, para a câmera utilizada, o pixel situado na linha superior e coluna mais da esquerda terá coordenadas 0 e 0, enquanto que o

pixel situado na linha inferior e mais a direita terá coordenadas 2047 e 2047. Trata-se, então de um referencial levógiro, conforme a figura 3.1.

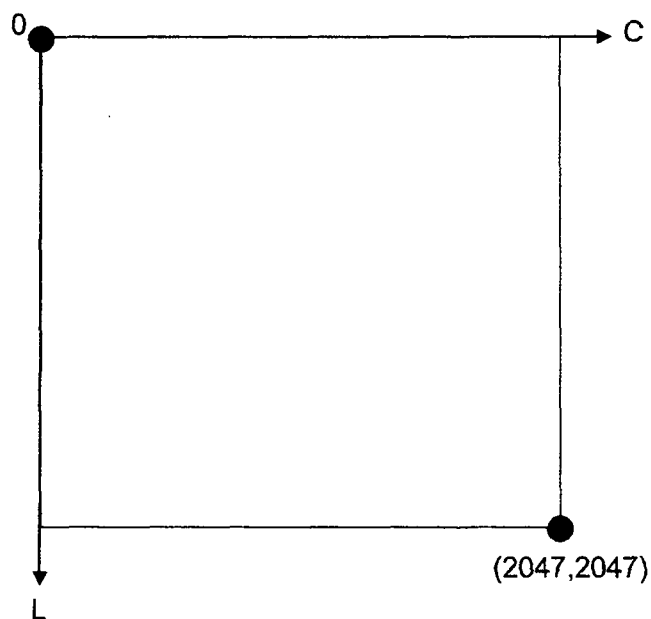


Figura 3.1 – Referencial do “Bitmap”

3.2.2. Referencial Fotogramétrico Digital

Neste trabalho foi proposto e utilizado o Referencial Fotogramétrico Digital como referencial de trabalho, ao invés do tradicionalmente definido e materializado por marcas fiduciais ou “reseau”, conhecido como referencial fiducial:

Origem: canto inferior esquerdo do “bitmap”; eixo O_x paralelo às linhas de pixels; eixo O_y paralelo às colunas de pixels, formando um referencial dextrógiro, com versor igual a 1 pixel para os dois eixos, de modo que o pixel inferior da esquerda tenha por coordenadas 0 e 0 e o superior direito da câmera a ser utilizada 2047 e 2047, conforme figura 3.2..

Havendo desejo de conhecer as coordenadas em unidades de milímetro, por exemplo, basta saber que a resolução da imagem é de 15 micrômetros. Ver com mais detalhes item 4.1. Entretanto, o pixel foi a unidade adotada em todo este trabalho para o referencial fotogramétrico.

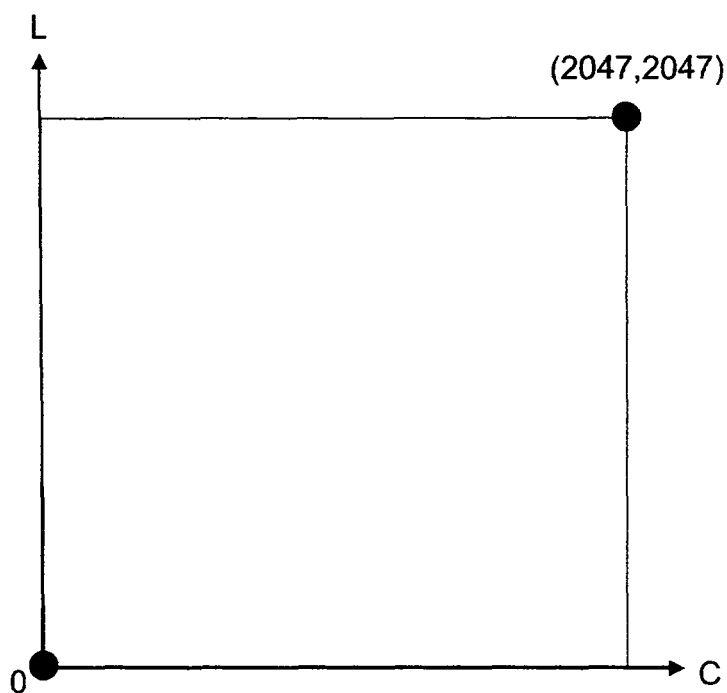


Figura 3.2 – Referencial Fotogramétrico Digital

3.2.3. Referencial Fotogramétrico

O referencial fotogramétrico utilizado neste trabalho é o mesmo definido para Aerofotogrametria: a origem está situada no nodo exterior da objetiva, tomada como centro de perspectiva; o eixo Oz é perpendicular aos planos do negativo e positivo, orientado positivamente para o plano do negativo; os eixos Ox e Oy são paralelos aos seus homônimos do Referencial Fotogramétrico Digital, formando com o primeiro um terno dextrógiro. A figura 3.3 mostra esse referencial, bem como um ponto genérico P no espaço objeto e a sua imagem p no plano positivo.

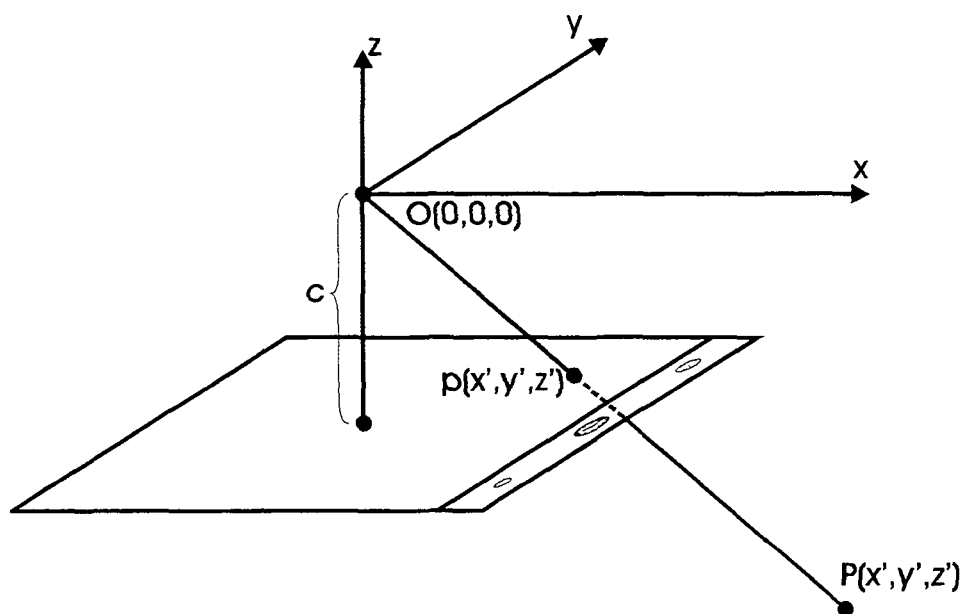


Figura 3.3 – Referencial Fotogramétrico¹

3.2.4. Referencial do Espaço Objeto

O referencial do espaço objeto pode ser arbitrado de acordo com as conveniências.

No caso da calibragem da câmera, em virtude de ser imageada uma parede vertical na qual foram pintados alvos, é conveniente que o plano XY do referencial repouse na superfície da parede, com o eixo OX orientado positivamente para a direita de quem observa a referida parede e o eixo OY orientado positivamente para cima. A origem pode ser localizada um pouco a esquerda e abaixo dos alvos. Isto garante todos os pontos com coordenadas X e Y positivas. O eixo OZ deve formar com os anteriores um referencial dextrógiro, estando, para tanto, orientado positivamente para a direção do observador.

Tal referencial resulta paralelo ao fotogramétrico quando o operador da câmera a aponta com o eixo ótico perpendicular à parede. Isto

¹ Figura retirada, com autorização do autor e Editora, do Livro "FOTOGRAMETRIA" de J. Bittencourt de Andrade.

facilita a avaliação dos valores aproximados dos parâmetros definidores da posição da câmera e dos ângulos de Euler que os dois referenciais apresentam no instante em que uma imagem é tomada. (Figura 3.4)

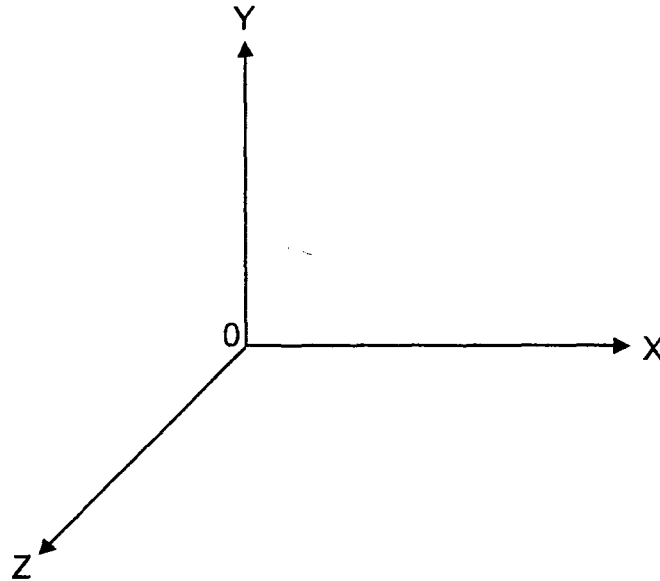


Figura 3.4 – Referencial do Espaço Objeto

3.2.5. Modelo Matemático

3.2.5.1. Transformação de Coordenadas de "Bitmap" para Fotogramétricas Digitais

Da figura 3.5, infere-se que:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}_{\text{FotoDig}} = P_2 \begin{Bmatrix} x \\ y - 1 \end{Bmatrix}_{\text{bitmap}}, \text{ ou} \quad (3.1)$$

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}_{\text{FotoDig}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y - 2048 \end{Bmatrix}_{\text{bitmap}}, \quad (3.2)$$

onde P_2 é uma reflexão do segundo elemento do vetor ao qual foi aplicada.

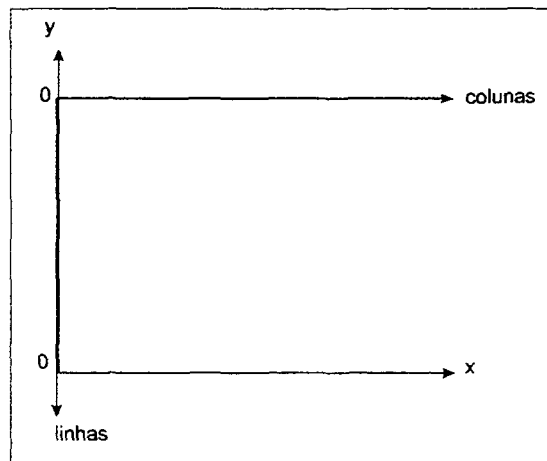


Figura 3. 5 – Transformação de Coordenadas de "Bitmap" para Fotogramétricas Digitais

3.2.5.2. Equações Projetivas

Para as determinações de coordenadas tridimensionais do objeto fotografado, as equações projetivas² são as mesmas da aerotriangulação analítica, enquanto que para a calibragem da câmera, estas equações são aumentadas dos termos corretivos que contém os parâmetros definidores das distorções das lentes – a distorção radial simétrica e a distorção descentrada. São elas:

$$\begin{cases} x - x_0 = -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y - y_0 = -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{cases}, \quad (3.3)$$

² As equações projetivas constituem parte da Geometria Euclidiana.

onde:

$$\begin{cases} m_{11} = \cos \varphi \cos \kappa \\ m_{12} = \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ m_{13} = \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ m_{21} = -\cos \varphi \sin \kappa \\ m_{22} = \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ m_{23} = \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ m_{31} = \sin \varphi \\ m_{32} = -\sin \omega \cos \varphi \\ m_{33} = \cos \omega \cos \varphi \end{cases} \quad (3.4)$$

$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}$ = coordenadas fotogramétricas digitais medidas das imagens;

$\begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{Bmatrix}$ = coordenadas calibradas do ponto principal, no referencial fotogramétrico digital;

c = distância focal calibrada;

$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}$ = coordenadas dos pontos objeto no referencial objeto;

$\begin{Bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{Bmatrix}$ = coordenadas dos centros de perspectiva no referencial objeto;

$\begin{Bmatrix} \omega \\ \phi \\ \kappa \end{Bmatrix}$ = ângulos de Euler – definem a atitude da câmera em relação ao

referencial objeto.

De forma abreviada, a equação 3.3 pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -c \frac{m}{q} \\ y - y_0 &= -c \frac{n}{q} \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.2.5.3. Distorção Radial Simétrica

Para finalidade de calibragem é necessário utilizar o modelo matemático da distorção radial simétrica sem o termo linear, pois este é correlacionado com a escala e por isso impossível de ser determinado simultaneamente com a distância focal. Assim, o seguinte modelo desenvolvido por CONRADY (1919), apenas para o processo de calibragem, corresponde à Distância Focal Gaussiana Equivalente:

$$\delta r' = K'_1 r^3 + K'_2 r^5 + K'_3 r^7, \quad (3.6)$$

onde:

$\delta r'$ = distorção radial simétrica;

K'_i , com $i=1, 2, 3$ = coeficientes do polinômio 3.6;

r = distância de um pixel ao ponto principal de fotogrametria.

Os valores dos coeficientes K_i do modelo 3.6 são determinados via calibragem e o termo linear pode ser introduzido arbitrariamente, o que faz alterar a função 3.6 da distorção radial simétrica e também a distância focal gaussiana equivalente. O coeficiente da parte linear será, então, arbitrado de modo a igualar, em módulo, os valores máximos positivo e negativo da curva de distorção radial simétrica. A escolha da reta passante pela origem e de coeficiente angular K_0 pode ser feita graficamente. O valor de K_0 é então dado por:

$$K_0 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\bar{y}}{r}, \quad (3.7)$$

onde:

K_0 = coeficiente de ordem linear da equação 3.9;

α = ângulo que a reta definida pelo primeiro termo da equação 3.9 forma com o eixo r ;

\bar{y} = ordenada da reta definida pelo primeiro termo da 3.9
para um valor escolhido da abcissa \bar{r} .

A nova distância focal por:

$$c = c'(1 - K'_0) , \quad (3.8)$$

onde:

c = distância focal calibrada;

c' = distância focal gaussiana equivalente.

e

$$\delta r = K_0 r + K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 , \quad (3.9)$$

onde:

$$K_i = \frac{c}{c'} K'_i , \quad (3.10)$$

resultando para as equações de correção da distorção radial
simétrica:

$$\begin{aligned} \delta x_1 &= (K_0 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) x \\ \delta y_1 &= (K_0 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) y \end{aligned} \quad (3.11)$$

3.2.5.4. Distorção Descentrada

O modelo proposto e demonstrado por CONRADY (1919),
modificado por BROWN (1966) é utilizado, pois que define com notável grau
de aproximação o fenômeno físico da distorção descentrada, que é originada
pela falta de alinhamento dos eixos ópticos em conjuntos de lentes, como nas
objetivas de câmeras fotográficas. Esse modelo é escrito como segue:

$$\begin{cases} \delta x_2 = [P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy] (1 + P_3r^2 + \dots) \\ \delta y_2 = [2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2)] (1 + P_3r^2 + \dots) \end{cases} \quad (3.12)$$

onde:

P_i = coeficientes do modelo Conrady-Brown para distorção descentrada.

Os termos em P_3 e superiores podem ser desprezados no caso de câmeras aerofotogramétricas em virtude da tecnologia utilizada na montagem das objetivas. Nas câmeras de pequeno formato, quando o ângulo de abertura da câmera é pequeno, da ordem de 60° ou menor, também os parâmetros P_1 e P_2 definem bem o fenômeno. Desta maneira, as fórmulas de correção da distorção descentrada são:

$$\begin{cases} \delta x_2 = [P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy] \\ \delta y_2 = [2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2)] \end{cases} \quad (3.13)$$

As equações projetivas, para a calibragem devem ser aumentadas, no caso de fotogrametria a curta distância, dos termos de correção da distorção radial simétrica e distorção descentrada, resultando, em forma compactada:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \delta x_1 + \delta x_2 + c \frac{m}{q} \\ y &= y_0 + \delta y_1 + \delta y_2 + c \frac{n}{q} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Assim, no processo de calibragem, as incógnitas procuradas no ajustamento por mínimos quadrados, entre muitas outras que pertencem ao problema, são:

$$\begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ c \\ K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} = \text{parâmetros da calibragem de uma câmera, definidos no item 3.2.5.2,}$$

pertencentes ao

$$\text{modelo: } L_a = F(X_a), \quad (3.15)$$

onde L_a são as observações ajustadas e X_a os parâmetros ajustados.

O ajustamento dos dados às equações projetivas pelo Método dos Mínimos Quadrados é realizado pelas equações bem conhecidas: Veja ELPHINGSTONE(1975) e UOTILA (1967)

$$X_a = X_0 + X, \quad (3.16)$$

onde X_a é o vetor dos parâmetros incógnitos, que inclui os parâmetros da calibragem mostrados anteriormente:

$$X_a = \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \omega \\ \phi \\ \kappa \\ x_0 \\ y_0 \\ c \\ K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix}. \quad (3.17)$$

X_0 é o vetor dos valores aproximados dos parâmetros na 3.16 e X é o vetor das correções aos valores aproximados, que é calculado pelas conhecidas equações normais do Método dos Mínimos Quadrados, que na sua forma matricial lê:

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L, \quad (3.18)$$

onde:

A = matriz das derivadas parciais do modelo em relação aos parâmetros incógnitos.

P = matriz dos pesos, geralmente diagonal;

$L = L_0 - L_b$, onde:

$L_0 = F(X_0)$ (modelo matemático), e

L_b = vetor das observações (no caso, as coordenadas no referencial fotogramétrico digital, das imagens dos alvos).

Para a montagem da Matriz A , torna-se necessário conhecer as derivadas parciais do modelo matemático em relação aos parâmetros incógnitos, que são as seguintes, considerando o modelo escrito na forma:

$$\begin{aligned} f(x) &= x - x_0 - \delta x_1 - \delta x_2 - c \frac{m}{q} \\ f(y) &= y - y_0 - \delta y_1 - \delta y_2 - c \frac{n}{q} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Para a função $f(x)$:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial \kappa} = -\frac{c}{q} (\Delta X \cdot m_{21} + \Delta Y \cdot m_{22} + \Delta Z \cdot m_{23}) \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x)}{\partial \phi} &= \frac{c}{q^2} [q(\Delta X \cdot \sin \phi \cos \kappa - \Delta Y \sin \omega \cos \phi \cos \kappa + \Delta Z \cos \omega \cos \phi \cos \kappa)] + \\ &+ \frac{c}{q^2} [m(\Delta X \cos \phi + \Delta Y \sin \omega \sin \phi - \Delta Z \cos \omega \sin \phi)] \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial \omega} = \frac{c}{q^2} [q(\Delta Y \cdot m_{13} - \Delta Z m_{12}) - m(\Delta Y \cdot m_{33} - \Delta Z \cdot m_{32})] \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial X_0} = \frac{c}{q^2} (q \cdot m_{11} - m \cdot m_{31}) \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial Y_0} = \frac{c}{q^2} (q \cdot m_{12} - m \cdot m_{32}) \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial Z_0} = \frac{c}{q^2} (q \cdot m_{13} - m \cdot m_{33}) \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial X} = -\frac{\partial f(x)}{\partial X_0} \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial Y} = -\frac{\partial f(x)}{\partial Y_0} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial Z} = -\frac{\partial f(x)}{\partial Z_0} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x_0} = -1 \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial y_0} = 0 \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial c} = -\frac{m}{q} \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial K_i} = -r^{i2} (x - x_0) \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial P_1} = -[r^2 + 2(x - x_0)^2] \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial f(x)}{\partial P_2} = -2(x - x_0)(y - y_0) \quad (3.34)$$

Para a função $f(y)$:

$$\frac{\partial f(y)}{\partial \kappa} = \frac{c}{q} (\Delta X \cdot m_{11} + \Delta Y \cdot m_{12} + \Delta Z \cdot m_{13}) \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(y)}{\partial \phi} = & \frac{c}{q^2} [-q(\Delta X \cdot \text{sen} \phi \text{sen} \kappa - \Delta Y \cdot \text{sen} \omega \cos \phi \text{sen} \kappa + \Delta Z \cos \omega \cos \phi \text{sen} \kappa)] + \\ & \frac{c}{q^2} [m(\Delta X \cos \phi + \Delta Y \text{sen} \omega \text{sen} \phi - \Delta Z \cos \omega \text{sen} \phi)] \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial \omega} = -\frac{c}{q^2} [q(-\Delta Y m_{23} + \Delta Z m_{22}) + n(\Delta Y m_{33} - \Delta Z m_{32})] \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial X_0} = -\frac{c}{q^2}(-qm_{21} + nm_{31}) \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial Y_0} = -\frac{c}{q^2}(qm_{22} - nm_{32}) \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial Z_0} = -\frac{c}{q^2}(qm_{23} - nm_{33}) \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial X} = -\frac{\partial f(y)}{\partial X_0} \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial Y} = -\frac{\partial f(y)}{\partial Y_0} \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial Z} = -\frac{\partial f(y)}{\partial Z_0} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial x_0} = 0 \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial y_0} = 1 \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial c} = -\frac{n}{q} \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial K_i} = -r^{i2}y \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial P_1} = -2(x - x_0)(y - y_0) \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial f(y)}{\partial P_2} = -[r^2 + 2(y - y_0)^2] \quad (3.49)$$

onde:

$$\Delta X = X - X_0$$

$$\Delta Y = Y - Y_0$$

$$\Delta Z = Z - Z_0$$

4. RECURSOS UTILIZADOS

4.1. CÂMERA UTILIZADA

A câmera utilizada foi uma MAMYIA 645 PRO, com as seguintes especificações:

1. Dados do CCD

- Alcance Dinâmico: 12 bits por cor; 36 bit RGB
- Tamanho do Arquivo: RGB 12 MB; CMYK 16 MB (a 8 bits por cor); RGB 24 MB; CMYK 32 MB (a 16 bits por cor)
- Velocidade de Captura: uma imagem por 0,8 s.
- Área da Matriz do CCD: sensor de 31mm; 2048 x 2048 pixels; tamanho do pixel 15 micrômetros; sensor selado com vidro.
- Velocidade Equivalente ao Filme: 80 ISO
- Velocidade do Obturador: ½ s a 1/250 s
- “BatPac” 1 até 1/500
- Fontes de luz: estroboscópica; tungstênio; luz do dia; HMI, fluorescente.

2. Computador: Macintosh Power PC

- Diretamente conectado a PCI Bus

3. Unidade de Armazenamento: BatPac

- Frequência de captura: 1 imagem a cada 0,7 segundos. Um “buffer” de 64 MB de memória RAM guarda até oito imagens. As imagens são transferidas automaticamente para o disco durante as pausas entre disparos do obturador, desocupando memória RAM.

- Tamanho do Arquivo: 8 MB de dados brutos não comprimidos ou 12 MB interpolados.
- Pode guardar até 77 imagens de resolução completa num PC Card padrão de 520 MB (PCMCIA) removível.
- Bateria removível e recarregável permite tomar milhares de imagens antes de recarregar. Pesa apenas 1,5 kg.

4. “Software”: PhotoShoot

4.2. ALVOS PARA A CALIBRAGEM

O campo de testes de câmeras de pequeno formato do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas consiste da pintura sobre a cerâmica amarela, na parede norte do bloco I, de alvos de dois tipos, em número de 25, nomeados de A a Z, faltando apenas a letra W. Um dos tipos de alvo pintados é em forma de círculos concêntricos, enquanto o outro tipo tem o formato de cruz. Estão distribuídos de forma aleatória, cobrindo uma área de aproximadamente 3,5 m de largura por 3,0 m de altura.

A distribuição dos alvos permitiu que fossem tomadas fotos nas distâncias aproximadas de 6m com a objetiva de 55mm e de 9,5 m com a objetiva de 80 mm. Os alvos circulares mostraram-se mais adequados para as mensurações, embora não tenha ocorrido nenhuma dificuldade nesse sentido.

A figura 4.1 mostra uma vista completa do campo de teste.

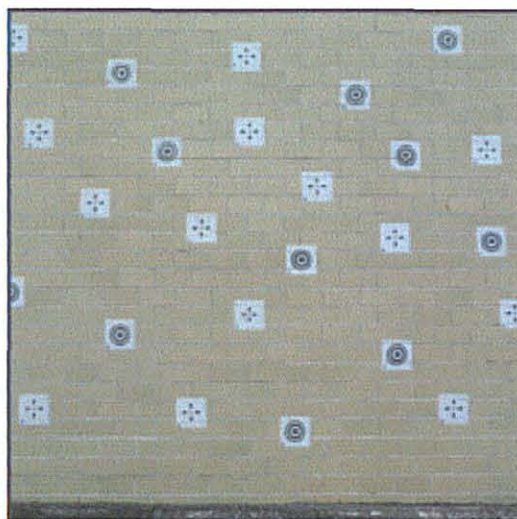
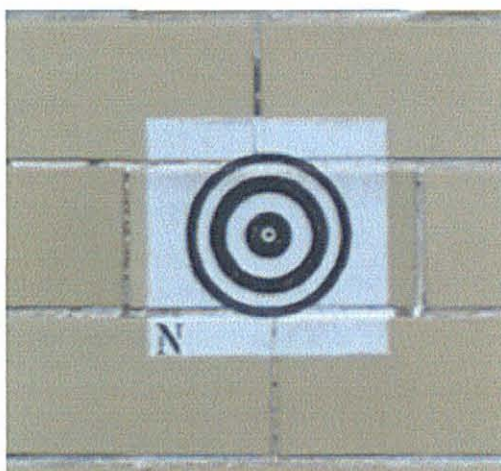
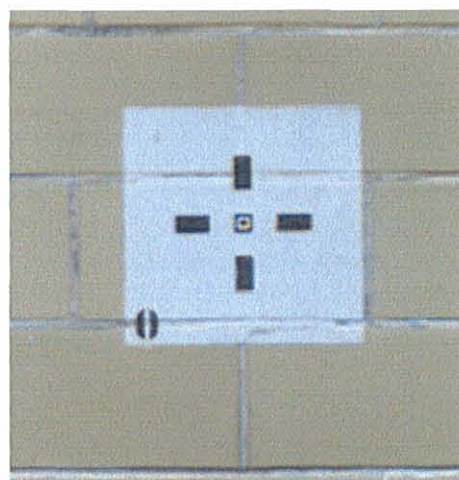


Figura 4.1. Imagem do Campo de Calibragem

A figura 4.2 mostra os dois tipos de alvos existentes no campo de calibragem do Centro Politécnico.



A



B

Figura 4.2 Os Tipos de Alvos

4.3. PROGRAMAS DE COMPUTAÇÃO UTILIZADOS

Os programas de computação utilizados foram os seguintes:

- Para a leitura das coordenadas de “bitmap”, o Micrografx Picture Publisher 8 © da Microsoft TM;
- Para a fototriangulação e calibragem, o GeoCalib © de Geokosmos TM;
- Para o gráfico da Distorção Radial Simétrica o Excel © da Microsoft TM.
- Para medir diâmetros das imagens digitais restituídas MicroStation © da BENTLEYTM.

5. CALIBRAGEM DA CÂMERA

A meta foi calibrar duas objetivas da mesma câmera. As etapas envolveram: tomada de imagens, leitura de coordenadas de “bitmap”; determinação de valores aproximados das incógnitas, fototriangulação preliminar, calibragem pelo método das câmeras convergentes e preparo de gráficos.

5.1. TOMADA DAS IMAGENS

Para a calibragem da objetiva de 55mm de distância focal, foram tomadas 16 imagens, numeradas de 1 a 16, em séries de quatro. Cada série consistiu de uma foto tomada do centro, outra tomada do centro e girada em 90° em torno do eixo óptico, outra da direita, com o eixo óptico fazendo 45° com o eixo óptico das fotos do centro e outra da esquerda, também com o eixo óptico fazendo 45° com o eixo óptico das fotos tomadas do centro. De cada uma dessas posições foram tomadas 4 fotos – a metade com abertura 5.6 e a outra metade com abertura 4.0. Tais fotos foram tomadas a uma distância de aproximadamente 6m do alvo, conforme figura 5.1.

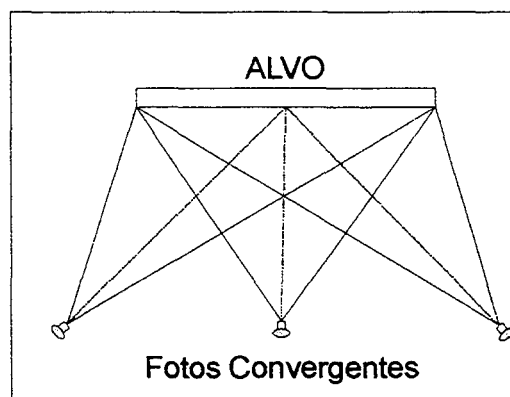


Figura 5.1 – Esquema da Tomada das Imagens

Uma série semelhante de fotos foi tomada com a objetiva de 80mm, sendo que ao todo 32 fotos ficaram disponíveis, o que permitiu a escolha das melhores. Resultou que a abertura de 4.0 permitiu as melhores imagens. Isso eliminou a metade das imagens. Escolheu-se, então, 4 imagens para cada objetiva, dando preferência àquelas que mostravam maior quantidade de alvos.

Ocorreu uma ótima distribuição dos alvos na área imageada, o que garantiu a qualidade da calibragem, especialmente no que se refere aos parâmetros de distorção radial simétrica e de distorção descentrada.

5.2. LEITURA DAS COORDENADAS DE "BITMAP"

As leituras das coordenadas de "bitmap" foram realizadas com auxílio do programa Micrografx Picture Publisher 8 © da Microsoft™. Para tanto, a imagem do alvo deve ser ampliada até que se possa identificar o pixel central do alvo. As leituras são feitas em forma adimensional, e significam # de coluna e # de linha onde está armazenado o pixel. Portanto, pode ser entendido que cada unidade corresponde a 1 pixel. Sabendo-se a resolução do sensor em micrômetros, torna-se possível mudar as coordenadas para micrômetro ou milímetro. A resolução do sensor câmera aqui calibrada é de 15 micrômetros.

Considerando que em qualquer levantamento interessa obter os resultados em unidades métricas (metro, por exemplo), as coordenadas do espaço objeto, no procedimento de calibragem, foram estabelecidas em metros e a unidade de comprimento para o referencial fotogramétrico foi o pixel. Assim, a entrada na curva de distorção, ou em suas equações se faz em pixel e a saída também resulta em pixels. Isto facilita muito ao usuário, pois pode efetuar todas as operações na unidade natural para imagens digitais que é o pixel. Este procedimento evita as transformações de unidades que podem se tornar fontes de erros.

É importante notar que ao processar os dados para calibração, num processo de ajustamento por mínimos quadrados, a detecção de qualquer erro em coordenadas fotogramétricas digitais permite que, imediatamente, refaçam-se as observações de coordenadas e se proceda em seguida o reproprocessamento, com perda de tempo minimizada.

5.2.1. Coordenadas dos Alvos com a Objetiva de 55 mm

Em virtude do explanado, as unidades de medida foram sempre pixel para as coordenadas de pontos imagem e o metro para o espaço objeto. Nas tabelas 5.1 até 5.4, os alvos são designados por letras maiúsculas, as duas primeiras colunas são as coordenadas de “bitmap”, ou seja, linhas e colunas; e as duas últimas colunas são as coordenadas no Referencial Fotogramétrico Digital.

TABELA 5.1 – Coordenadas da Imagem 3

Distância focal (f) 55 mm

Abertura (f/ 4.0)

Posição central (centro)

Imagem 3	f=55mm	f/ 4.0	centro	
Ponto	X'	Y'	X	Y
A	21	114	21	1934
B	453	256	453	1792
C	951	185	951	1863
D	1747	119	1747	1929
E	126	491	126	1557
F	636	565	636	1483
G	964	485	964	1563
H	1383	339	1383	1709
I	1583	581	1583	1467
J	1906	556	1906	1492
K	350	771	350	1277
L	773	868	773	1180
M	1233	704	1233	1344
N	1171	995	1171	1053
O	1540	909	1540	1139
P	1924	922	1924	1126
Q	—	—	—	—
R	446	1297	446	751
S	962	1213	962	835
T	1547	1375	1547	673
U	2016	1209	2016	839
V	105	1589	105	459
X	733	1603	733	445
Y	1146	1681	1146	367
Z	1774	1588	1774	460

TABELA 5. 2 – Coordenadas da Imagem 5

Distância focal '(f) 55 mm

Abertura (f/ 4.0)

Posição central com giro de 90° (centro giro)

Imagem 5	f=55	f/ 4.0	centro	giro
Ponto	X'	Y'	X	Y
A	—	—	—	—
B	1736	382	1736	1666
C	1808	880	1808	1168
D	1878	1675	1878	373
E	1499	54	1499	1994
F	1427	567	1427	1481
G	1508	895	1508	1153
H	1656	1312	1656	736
I	1415	1513	1415	535
J	1441	1835	1441	213
K	1219	281	1219	1767
L	1124	705	1124	1343
M	1290	1164	1290	884
N	999	1103	999	945
O	1088	1471	1088	577
P	1077	1854	1077	194
Q	—	—	—	—
R	693	381	693	1667
S	780	896	780	1152
T	622	1481	622	567
U	791	1947	791	101
V	397	40	397	2008
X	388	669	388	1379
Y	314	1082	314	966
Z	411	1708	411	340

TABELA 5.3 – Coordenadas da Imagem 11

Distância foca (f) 55 mm

Abertura (f/ 4.0)

Posição direita (direita)

Imagem 11	f=55	f/ 4.0	direita	
Ponto	X'	Y'	X	Y
A	356	423	356	1625
B	592	499	592	1549
C	895	407	895	1641
D	1466	275	1466	1773
E	410	689	410	1359
F	697	723	697	1325
G	902	647	902	1401
H	1188	500	1188	1548
I	1333	694	1333	1354
J	1589	653	1589	1395
K	530	888	530	1160
L	777	954	777	1094
M	1078	812	1078	1236
N	1032	1051	1032	997
O	1295	976	1295	1072
P	1596	983	1596	1065
Q	343	1146	343	902
R	581	1277	581	771
S	892	1224	892	824
T	1293	1372	1293	676
U	1669	1242	1669	806
V	393	1479	393	569
X	747	1519	747	529
Y	1008	1603	1008	445
Z	1465	1568	1465	480

TABELA 5.4 – Coordenadas da Imagem 15

Distância focal (f) 55 mm

Abertura (f/ 4.0)

Posição esquerda (esquerda)

Imagem 15	f=55	f/ 4.0	esquerda	
Ponto	X'	Y'	X	Y
A	287	197	287	1851
B	630	389	630	1659
C	970	388	970	1660
D	1428	418	1428	1630
E	380	567	380	1481
F	766	679	766	1369
G	993	637	993	1411
H	1232	554	1232	1494
I	1346	754	1346	1294
J	1513	754	1513	1294
K	561	843	561	1205
L	863	947	863	1101
M	1150	831	1150	1217
N	1117	1062	1117	986
O	1327	1003	1327	1045
P	1527	1022	1527	1026
Q	289	1160	289	888
R	642	1316	642	732
S	992	1239	992	809
T	1338	1359	1338	689
U	1576	1231	1576	817
V	381	1598	381	450
X	848	1573	848	475
Y	1111	1615	1111	433
Z	1460	1514	1460	534

5.2.2. Coordenadas dos Alvos com a Objetiva de 80 mm

O mesmo tratamento dado para a objetiva de 55mm foi aplicado com a de 80 mm. As unidades de medida foram sempre pixel para as coordenadas de pontos imagem. Nas tabelas 5.5 até 5.8, os alvos são designados por letras maiúsculas, as duas primeiras colunas são as coordenadas de "bitmap", ou seja, linhas e colunas; e as duas últimas colunas são as coordenadas no Referencial Fotogramétrico Digital.

TABELA 5.5 – Coordenadas da Imagem 19

Distância focal (f) 80 mm

Abertura (f/ 4).0

Posição central (centro)

Imagem 19	f=80mm	f/ 4.0	centro	
Ponto	X'	Y'	X	Y
A	73	125	73	1923
B	482	256	482	1792
C	939	191	939	1857
D	1657	128	1657	1920
E	181	475	181	1573
F	660	540	660	1508
G	959	465	959	1583
H	1335	330	1335	1718
I	1521	547	1521	1501
J	1810	521	1810	1527
K	399	732	399	1316
L	793	817	793	1231
M	1208	662	1208	1386
N	1160	927	1160	1121
O	1491	844	1491	1204
P	1836	851	1836	1197
Q	81	1064	81	984
R	502	1216	502	832
S	976	1130	976	918
T	1511	1267	1511	781
U	1926	1109	1926	939
V	188	1496	188	552
X	775	1493	775	555
Y	1156	1555	1156	493
Z	1722	1457	1722	591

TABELA 5.6 – Coordenadas da Imagem 23

Distância foca (f) 80 mm

Abertura (f/ 4.0)

Posição central com giro de 90° (centro giro)

Imagem 23	f=80mm	f/ 4.0	centro	giro
Ponto	X'	Y'	X	Y
A	...	...	...	....
B	1770	386	1770	1662
C	1837	850	1837	1198
D	1904	1573	1904	475
E	1544	80	1544	1968
F	1481	571	1481	1477
G	1559	875	1559	1173
H	1698	1253	1698	795
I	1479	1443	1479	605
J	1506	1732	1506	316
K	1282	307	1282	1741
L	1199	711	1199	1337
M	1360	1129	1360	919
N	1090	1084	1090	964
O	1177	1417	1177	631
P	1174	1762	1174	286
Q	...	...	...	...
R	788	419	788	1629
S	881	900	881	1148
T	750	1443	750	605
U	914	1857	914	191
V	496	99	496	1949
X	508	700	508	1348
Y	452	1088	452	960
Z	560	1656	560	392

TABELA 5.7 – Coordenadas da Imagem 27

Distância focal (f) 80 mm

Abertura (f/ 4.0)

Posição direita (direita)

Imagem 27	f=80mm	f/ 4.0	direita	
Ponto	X'	Y'	X	Y
A	146	157	146	1891
B	476	264	476	1784
C	892	144	892	1904
D	...	...	...	...
E	224	520	224	1528
F	622	569	622	1479
G	902	466	902	1582
H	1291	273	1291	1775
I	1487	533	1487	1515
J	1831	481	1831	1567
K	393	789	393	1259
L	734	879	734	1169
M	1143	689	1143	1359
N	1082	1008	1082	1040
O	1436	909	1436	1139
P	1842	917	1842	1131
Q	134	1137	134	911
R	466	1312	466	736
S	893	1239	893	809
T	1436	1434	1436	614
U	1938	1260	1938	788
V	207	1586	207	462
X	695	1633	695	415
Y	1052	1743	1052	305
Z	1668	1691	1668	357

TABELA 5.8 – Coordenadas da Imagem 31

Distância foca (f) 80 mm

Abertura (f/ 4.0)

Posição esquerda (esquerda)

Imagem 31	f=80mm	f/ 4.0	esquerda	
Ponto	X'	Y'	X	Y
A	...	...	...	...
B	503	182	503	1866
C	917	167	917	1881
D	1487	190	1487	1858
E	206	405	206	1643
F	667	531	667	1517
G	932	476	932	1572
H	1240	366	1240	1682
I	1381	612	1381	1436
J	1593	607	1593	1441
K	421	733	421	1315
L	785	855	785	1193
M	1136	710	1136	1338
N	1095	994	1095	1054
O	1356	919	1356	1129
P	1608	941	1608	1107
Q	101	1115	101	933
R	519	1301	519	747
S	941	1209	941	839
T	1367	1358	1367	690
U	1669	1200	1669	848
V	211	1635	211	413
X	765	1612	765	436
Y	1087	1666	1087	382
Z	1520	1549	1520	499

5.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS

A primeira etapa do processamento dos dados foi a de transformar as coordenadas de “bitmap” (levógiras) para o referencial fotogramétrico digital (dextrógiro). Estes cálculos, que consistem em uma reflexão e uma translação aplicados ao vetor posição de cada ponto, foram realizados no programa Excel © da Microsoft TM.

Os valores aproximados das incógnitas foram realizados no campo de teste, com auxílio de uma trena, quando foram medidas as coordenadas aproximadas dos centros dos alvos, das posições em que as fotos foram tomadas e a distância, esta com rigor, entre os alvos G e X (ver figura 4.1). Os valores aproximados dos ângulos de Euler foram relativamente fáceis de inferir, em virtude da forma como foram definidos os referenciais utilizados. O referencial fotogramétrico resultou paralelo ao do espaço objeto quando a câmera apontava normalmente para os alvos a partir de um ponto situado bem a frente. Assim, os ângulos girados pela câmera foram fáceis de determinar.

A etapa seguinte consistiu do processamento desses dados, calculando uma fototriangulação com as quatro imagens envolvidas, com um ajustamento livre, ou seja, com mínimo de injunções, utilizando o programa da GEOKOSMOSTM, denominado GeoCalib ©. Este processamento é necessário para analisar a existência de erros grosseiros e foi realizado fixando a posição e atitude da câmera ao tomar a primeira imagem, ou seja, 3 coordenadas e os três ângulos de Euler, mais a distância entre os pontos G e X. Foram encontrados poucos pontos errados: um para a objetiva de 55mm e 4 para a objetiva de 80mm, que ocorreram em razão das coordenadas dos pontos terem sido anotadas manualmente. Refeitas as leituras, o processamento mostrou resultados muito bons, ou seja, da ordem de 0,35 pixel, como pode ser visto nos Anexos I e II, o que permitiu o prosseguimento do processamento.

A operação seguinte foi o processamento da calibragem, também realizado pelo software GeoCalib © da GEOKOSMOSTM. Desta feita,

foi fixada a posição e atitude da câmera ao tomar a foto central (primeira foto) e utilizada a distância medida.

Com os resultados da calibragem, foi calculado o valor de K_0 que equilibra os valores máximos positivo e negativo da curva de distorção radial simétrica e o correspondente novo valor da distância focal.

Foi, então, utilizado o software Excel© da Microsoft™ para preparar os gráficos de distorção radial simétrica.

5.4. RESULTADOS DAS CALIBRAGENS

5.4.1. Dados finais da calibragem da Objetiva de 55mm

As unidades utilizadas na calibragem das objetivas foi o pixel, que na câmera em tela é de 15 micrômetros.

Distância focal gaussiana equivalente (parâmetro do ajustamento)

$$c' = 3742.1672 \text{ "pixels"}$$

RESUMO DOS RESULTADOS DA CALIBRAGEM

Distância focal calibrada:

$$c = 3721,585 \text{ "pixels"} (55,824) \text{ mm} \pm 7,509 \text{ "pixels"} (\pm 0,112 \text{ mm}) \text{ de erro padrão.}$$

Coordenadas do ponto principal, no referencial fotogramétrico digital

$$x_0 = 1023,4388 \text{ "pixels"} (15,352 \text{ mm}) \pm 10,046 \text{ "pixels"} (\pm 0,151 \text{ mm}) \text{ de erro padrão.}$$

$$y_0 = 1153,6683 \text{ "pixels"} (17,305 \text{ mm}) \pm 9,985 \text{ "pixels"} (\pm 0,150 \text{ mm}) \text{ de erro padrão.}$$

Coeficientes da curva de distorção radial simétrica

$$K_0 = 5,5000\text{E-}0003 \text{ (valor adotado)}^3$$

$$K_1 = -3,8505\text{E-}0009 \pm 3,4243\text{E-}0009$$

$$K_2 = -4,9565\text{E-}0016 \pm 3,4354\text{E-}0015$$

$$K_3 = 3,0553\text{E-}0022 \pm 1,2500\text{E-}0021$$

Coeficientes da curva de distorção descentrada

$$P_1 = -1,4043\text{E-}0007 \pm 1,7270\text{E-}0007$$

$$P_2 = -5,0435\text{E-}0007 \pm 1,9180\text{E-}0007$$

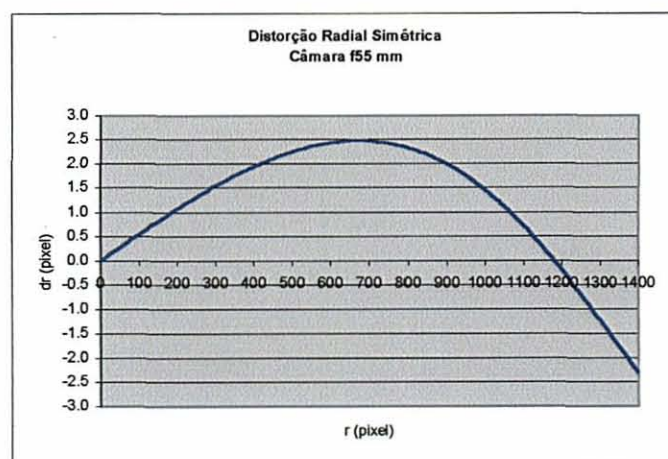


Figura 5.2 – Gráfico de Distorção Radial Simétrica para a Objetiva de 55 mm

³ Valor escolhido de modo a igualar em módulo a maior distorção radial simétrica positiva com a maior negativa, balanceando, portanto a curva.

5.4.2. Dados finais da Calibragem da Objetiva de 80mm

As unidades utilizadas na calibragem das objetivas foi o pixel, que na câmera em tela é de 15 micrômetros.

Distância focal gaussiana equivalente (parâmetro ajustado):

$c' = 5372,1698$ pixels

RESUMO DOS RESULTADOS DA CALIBRAGEM

Distância focal calibrada:

$c = 5356,822$ "pixels" (80,352 mm) $\pm 11,299$ "pixels" ($\pm 0,169$ mm) de erro padrão.

Coordenadas do ponto principal, no referencial fotogramétrico digital

$x_0 = 1062,6303$ "pixels" (15,939 mm) $\pm 6,2510$ "pixels" de erro padrão.

$y_0 = 947,1720$ "pixels" (14,208 mm) $\pm 6,9084$ "pixels" de erro padrão

Coeficientes da curva de distorção radial simétrica

$K_0 = 2,8570E-0003$ (valor adotado)⁴

$K_1 = -4,7134E-0009 \pm 2,9208E-0009$

$K_2 = 6,1789E-0015 \pm 3,002E-0015$

$K_3 = -2,5251E-0021 \pm 1,040E-0021$

Coeficientes da curva de distorção descentrada

$P_1 = 4,2885E-0007 \pm 2,0759E-0007$

$P_2 = 2,4537E-0007 \pm 2,8494E-0007$

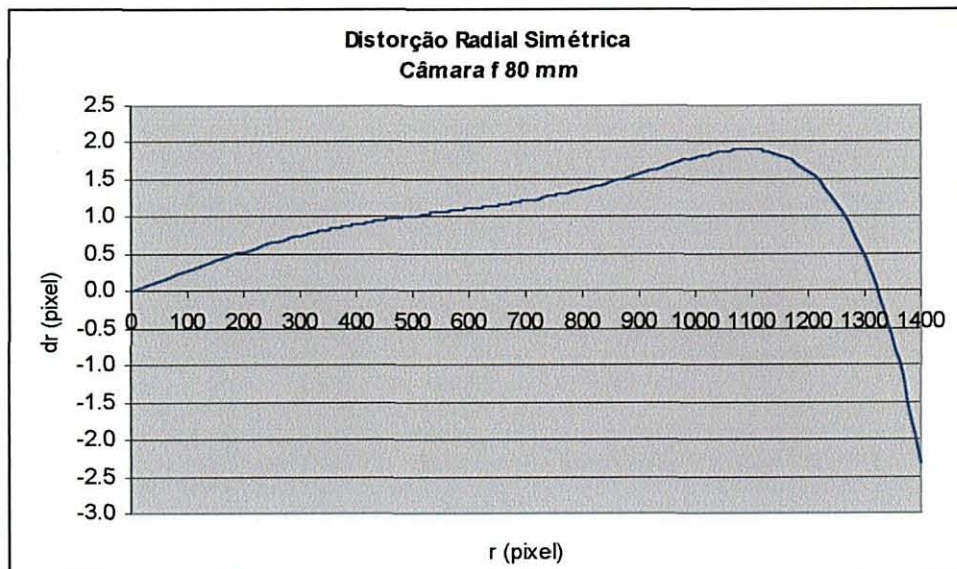


Figura 5.3 – Gráfico de Distorção Radial Simétrica para a objetiva de 80 mm

⁴ Valor escolhido para compensar a curva de distorção radial simétrica de modo a igualar em módulo a maior distorção positiva com a maior negativa.

5.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CALIBRAGEM

Os ajustamentos pelo Método dos Mínimos Quadrados da calibragem das duas objetivas mostraram valor da variância da unidade de peso estatisticamente igual a 1. Isto significa, que os pesos adotados foram adequados e que no processo não houve erros grosseiros, que os erros sistemáticos foram tratados adequadamente e que o modelo matemático foi adequado.

A matriz variância-covariância de todos os parâmetros incógnitos foi calculada e está mostrada no anexo I para a objetiva de 55mm de distância focal nominal e anexo II para a objetiva de 80 mm. A raiz quadrada dos elementos da diagonal dessa matriz é o desvio padrão. Pode-se verificar que os valores estão dentro do que se poderia esperar, segundo a precisão inerente das coordenadas fotogramétricas digitais das imagens envolvidas no trabalho.

Assim, o desvio padrão para a distância focal nominal de 55 mm, foi de 7,509 pixels, o que corresponde a 0,113 mm e para a distância focal nominal de 80mm, foi de 11,299 pixels, ou 0,169 mm.

Da mesma forma, os demais parâmetros calculados apresentam grau de incerteza muito baixos, como pode ser verificado nos itens 5.4.1 e 5.4.2, bem como nos anexos I e II.

6. MENSURAÇÕES DENDROMÉTRICAS COM CÂMERAS DIGITAIS CALIBRADAS

Neste trabalho, as figuras geométricas tratadas terão sempre como base as coordenadas de pontos que a definam. Desta maneira, as equações da geometria analítica sempre poderão ser aqui aplicadas.

Para atender a generalidade dos problemas que podem ser tratados com a fotogrametria a curta distância, é didático classificar os problemas a fim de criar metodologia adequada e bem definida para cada caso.

De acordo com esse critério, pode ser dito que as observações sejam de ordem estática ou dinâmica. Estática quando o objeto da mensuração permanece imóvel ao longo do tempo e dinâmica quando o objeto é dotado de movimento em relação ao referencial do espaço objeto.

6.1. MEDIDAS ESTÁTICAS

No presente trabalho, as medidas estáticas é que serão objeto de experimentação.

O método fotogramétrico exige a definição e a materialização de um referencial cartesiano tridimensional do espaço objeto, para posicionar os pontos definidores de qualquer figura que se deseje representar.

6.1.1. Distâncias

O caso mais simples é o de distâncias, para o qual a geometria analítica permite escrever:

$$d = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (6.1a)$$

6.1.2. Áreas

Tratando-se de uma superfície irregular, tornar-se-á necessário preparar um MODELO DIGITAL DA SUPERFÍCIE (MDS), ou seja, a representação da superfície por um conjunto de pontos que, se ligados por triângulos, por exemplo, formarão um modelo digital desta superfície. O grau de aproximação do modelo para a superfície real dependerá, naturalmente da existência de pontos em densidade e localização adequados. É exatamente a tecnologia do DTM – Modelo Digital do Terreno, aqui aplicada para qualquer superfície.

Essa tecnologia permite, não apenas representar uma superfície com o grau de aproximação desejado, como nela executar mensurações. Assim, a área de uma superfície irregular complexa pode ser determinada pela soma das áreas dos triângulos do MDS.

Nos casos mais simples, a área procurada é de um plano paralelo a qualquer dos planos diedros do referencial do espaço objeto e as planilhas de cálculo, como as utilizadas na topografia, servem muito bem para calcular áreas. Como esse referencial é arbitrário, sempre será possível a sua escolha de modo a tornar mais simples os cálculos que devem ser executados para atingir os objetivos.

6.1.3. Volumes

Os volumes definidos por superfícies complexas podem ser obtidos a partir de um MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE (MDS), com o

mesmo tipo de tratamento anteriormente explanado para as áreas, o que permite o uso das fórmulas da geometria analítica.

Volumes menos complexos, que podem ser definidos por modelos de figuras geométricas como paralelepípedos, cilindros, cones, tronco de cones, pirâmides ou tronco de pirâmides, podem ter o volume calculado de forma mais simples.

As árvores, por exemplo, podem ser tratadas como sendo de formato tronco-cônico, numa primeira aproximação, ou como uma somatória de pequenos tronco-cones. Ocorre que o cálculo do volume de um tronco de cone exige o conhecimento das áreas das seções transversais nas duas extremidades ou a área da seção média. A área da seção transversal na extremidade inferior da árvore é fácil de conseguir, seja medindo o seu perímetro e admitindo que a seção transversal seja circular, ou determinando o seu diâmetro médio, obtido pela média de dois diâmetros perpendiculares. Entretanto, as seções, a partir de 2m de altura, pela dificuldade de acesso, são difíceis de serem medidas. Daí resulta, que a Engenharia Florestal desenvolveu métodos e instrumentos voltados a tornar factíveis as determinações de volumes na árvore em pé com grau de incerteza compatível com os aspectos econômicos ligados ao problema do uso da madeira.

6.2. MEDIDAS DINÂMICAS

As medidas dinâmicas não são o objeto deste trabalho. São aqui mencionadas pelo desejo de que este trabalho tenha também um cunho didático e por tratar-se de assunto que poderá ser abordado num futuro próximo. Neste processo, o tempo também deve ser medido e de preferência registrado automaticamente pela própria câmera fotográfica. No caso é importante a mensuração de intervalos de tempo com rigor. A hora exata

pode não ser importante, o que, se for o caso, torna os procedimentos um pouco mais simples.

6.2.1. Velocidades

A velocidade de um móvel pode ser constante ou não ao longo do tempo. Isto determinará o procedimento de tomada de imagens. De qualquer forma, duas tecnologias bem distintas poderão ser utilizadas segundo as conveniências que o caso ofereça: 1) tomada de imagens múltiplas do móvel, de modo que o referencial do espaço objeto possa ser materializado univocamente para cada exposição realizada; 2) tomada de imagens sobrepostas (múltiplas exposições no mesmo quadro). Esta técnica exige que a câmera permita tal procedimento e é útil quando o tempo de exposição é muito grande. Quando existem objetos se movendo com velocidades muito diferentes, é possível utilizar câmeras com dois obturadores – um rápido e outro lento.

6.2.2. Variações Temporais

Qualquer fenômeno que seja função do tempo pode ser avaliado pelas tecnologias da fotogrametria a curta distância, tomadas com intervalos de tempo adequado: seja o crescimento de uma árvore, seja a análise de uma estrutura de madeira ao longo do tempo, para verificar deformações plásticas ou elásticas, seja a monitoração do desenvolvimento de uma praga em árvores específicas, afinal todos os fenômenos variáveis com o tempo.

Na área florestal, nos ensaios de resistência da madeira, é desejável medir as deformações elásticas e plásticas que uma peça de madeira experimenta ao ser submetida a uma carga. Tomadas de imagens antes e após a peça receber a carga conduzirão a dois conjuntos de coordenadas de pontos e análise das deformações.

6.3. EXPERIÊNCIA EM DENDROMETRIA

Dendrometria é a ciência que visa, dentre outras, a obtenção de medidas geométricas das árvores.

As técnicas da fotogrametria a curta distância, com tratamento analítico e imagens digitais possuem os pré-requisitos necessários para atender, com as vantagens desejadas, seja para acelerar os procedimentos de campo, seja para garantir a possibilidade de revisão dos dados sem a volta ao campo. As coordenadas em imagens digitais podem ser medidas muito rapidamente e com grande precisão em ambiente de computador pessoal na mesma ocasião em que os dados estão sendo processados, permitindo assim, a recuperação de dados afetados por erros, a um custo muito próximo de zero.

Foram feitos três experimentos, todos na Fazenda Experimental do Canguirí do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Infelizmente, das duas objetivas calibradas – 55mm e 80mm – a mais adequada para os experimentos – 55mm – não estava disponível no dia em que foram realizados os três experimentos. O inconveniente resulta da distância para tomar as imagens que passa de 55 m para 80 m, para a mesma escala que garanta as imagens das árvores inteiras.

No primeiro experimento, imagens foram tomadas de dentro do talhão. Três imagens convergentes foram tomadas, para permitir uma fototriangulação com a leitura das coordenadas dos alvos colocados nas árvores e de pontos fotoidentificáveis no alto das árvores. A distância entre alvos colocados na mesma árvore foram medidos, bem como, pelo menos uma distância entre alvos colocados em árvores distantes entre si, para dar a escala da fototriangulação. Foram tomados os cuidados para a obtenção dos valores aproximados das incógnitas inerentes da fototriangulação, bem como para fixar a posição e atitude da câmera.

Com esse objetivo, foi admitido que o referencial do espaço objeto tem origem coincidente com o da imagem central, com os eixos OX e

OY segundo um plano vertical e o eixo OZ horizontal, orientado positivamente para a direção da câmera. O eixo OX é positivo para a direita do fotógrafo e o eixo OY é positivo para cima (zênite).

6.3.1. Coordenadas Obtidas por Intersecção

As coordenadas de pontos do espaço objeto podem ser determinadas por intersecção pelo método de fototriangulação extremamente bem conhecido do “bundle method” (feixe de raios perspectivos). Ver BROWN (1977) e KENEFICK (1971).

O “bundle method” determina a posição e atitude da câmera nas posições em que as imagens foram tomadas, permitindo, por isso, a orientação relativa e absoluta das imagens numa estação digital.

A partir do modelo tridimensional em estação digital, tem-se o método da intersecção funcionando em tempo real, mostrando, a todo o tempo a posição espacial da marca flutuante. Fazendo-a coincidir estereoscopicamente com o ponto imagem que se deseja determinar as coordenadas especiais, tem-se as três coordenadas do ponto. Isto permite a compilação estereoscópica dos objetos fotografados.

As árvores de interesse foram estereo-compiladas em arquivos tri-dimensionais, a partir dos quais, com o uso de um CAD torna-se possível dividir a imagem das árvores em troncos-cone e desses obter os diâmetros das seções transversais e as alturas.

A estereocompilação foi realizada com a estação digital GeoCompiler®, de propriedade da ENGEFOTO™ e desenvolvida pela GEOKOSMOS™. O CAD utilizado foi o MicroStation® da BENTLEY™, de propriedade da ENGEFOTO™.

6.3.2. Experimento 1 – Dentro do Talhão

Este experimento ficou prejudicado em virtude do fato de que a câmera disponibilizada só contava, na ocasião de tomar as imagens no talhão de Pinus da Fazenda da Universidade, com a objetiva de 80mm. Isto implicava numa distância bem maior para a tomada das fotos. O local correto de tomar as fotos ficou fora do talhão, dentro de uma mata muito fechada que impedia o acesso. Mesmo assim, foram feitas as imagens de uma distância menor que a planejada. Em virtude do exposto, as árvores de interesse foram imageadas até uma determinada altura apenas.

A fim de garantir boas imagens, foram feitas 5 seqüências de cada uma das três posições. Da posição central, foram medidas as distâncias para a árvore central, ou seja aquela para a qual convergiam as tomadas de imagens, bem como para as posições esquerda e direita das outras duas tomadas, para calcular os valores aproximados das posições da câmera, bem como a sua atitude.

Outros dois experimentos foram realizados em substituição ao primeiro, para verificar a eficácia da tecnologia proposta.

6.3.3. Experimento 2 – Da borda do Talhão

A mesma técnica descrita para o experimento 1 foi repetida. As tabelas 6.1 a 6.3 mostram as coordenadas de “bitmap” dos pontos tomados como alvos. Em cada árvore de interesse foram colocados dois alvos do tipo circunferência branca dentro de quadrado preto e foram medidas as distâncias entre os seus centros. Ver imagens 32, 38 e 41, relativas as figuras 6.1, 6.2 e 6.3. Além dos alvos artificiais, foram medidas coordenadas de pontos fotoidentificáveis no alto das árvores. Pontas de galhos secos e nós mostraram-se muito úteis para essa finalidade.

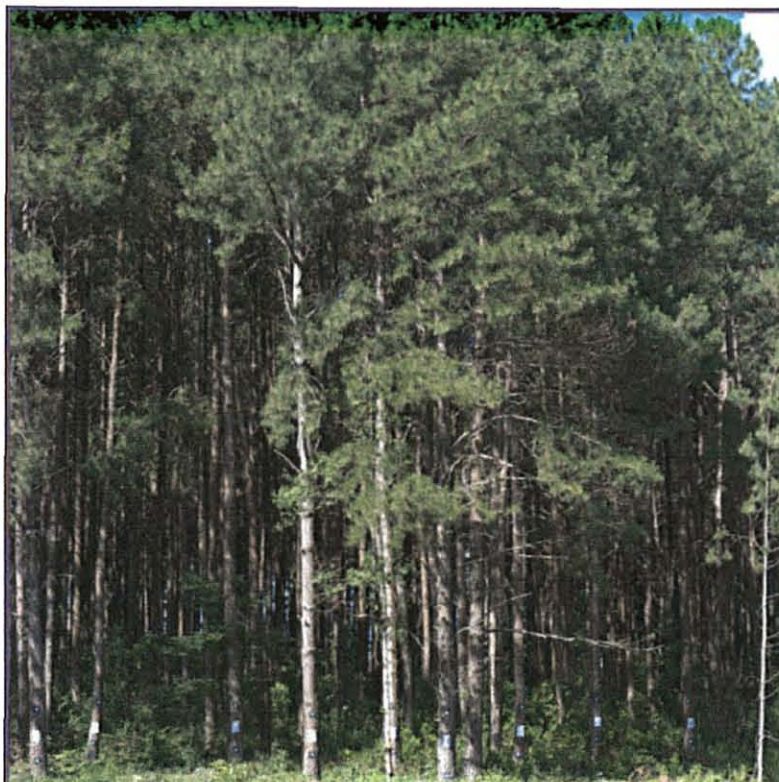


Figura 6.1 - Imagem 32 –Experimento 2 - Pinus



Figura 6.2 - Imagem 38 –Experimento 2 - Pinus



Figura 6.3 - Imagem 41 – Experimento 2 - Pinus

A primeira coluna das tabelas em epígrafe traz o nome do ponto, constituído por uma letra que designa a árvore e um número que designa o ponto naquela árvore. As colunas 2 e 3 trazem as coordenadas de “bitmap” dos pontos descritos e as colunas 4 e 5 as coordenadas dos mesmos pontos no sistema de referência fotogramétrico digital. As unidades das coordenadas são o pixel.

TABELA 6.1 – Coordenadas da Imagem 32

Imagem 32C	f=80	f/ 5.6	centro	
Ponto	X'	Y'	X	Y
S1	88	1975	88	73
S2	84	1841	84	207
R1	233	1929	233	119
R2	247	1823	247	225
Q1	610	1949	610	99
Q2	607	1833	607	215
P1	810	1959	810	89
P2	809	1853	809	195
T1	1021	1951	1021	97
T2	1015	1832	1015	216
U1	1164	2015	1164	33
U2	1161	1849	1161	199
V1	1349	1958	1349	90
V2	1356	1834	1356	214
W1	1554	1918	1554	130
W2	1552	1814	1552	234
X1	1801	1925	1801	123
X2	1792	1819	1792	229
P3	719	687	719	1361
R3	266	594	266	1454
U3	1629	796	1629	1252

TABELA 6.2 – Coordenadas da Imagem 38

Imagem 38E	f=80	f/ 5.6	exquerda	
Ponto	X'	Y'	X	Y
S1	163	1760	163	288
S2	159	1623	159	425
R1	235	1709	235	339
R2	249	1601	249	447
Q1	642	1728	642	320
Q2	637	1611	637	437
P1	931	1741	931	307
P2	930	1636	930	412
T1	1067	1730	1067	318
T2	1062	1613	1062	435
U1	1293	1794	1293	254
U2	1292	1632	1292	416
V1	1364	1735	1364	313
V2	1372	1614	1372	434
W1	1465	1691	1465	357
W2	1464	1590	1464	458
X1	1657	1696	1657	352
X2	1650	1593	1650	455
Y1	1848	1679	1848	369
Y2	1845	1615	1845	433
P3	828	463	828	1585
R3	242	311	242	1737
U3	1804	612	1804	1436

TABELA 6.3 – Coordenadas da Imagem 41

Imagem 41D	f=80	f/ 5.6	direita	
Ponto	X'	Y'	X	Y
S1	207	1821	207	227
S2	200	1695	200	353
R1	404	1776	404	272
R2	414	1675	414	373
Q1	730	1785	730	263
Q2	725	1674	725	374
P1	832	1788	832	260
P2	829	1686	829	362
T1	1098	1778	1098	270
T2	1089	1663	1089	385
U1	1149	1834	1149	214
U2	1144	1673	1144	375
V1	1432	1778	1432	270
V2	1437	1656	1437	392
W1	1734	1735	1734	313
W2	1729	1633	1729	415
X1	2024	1737	2024	311
X2	2013	1631	2013	417
P3	719	571	719	1477
R3	410	579	410	1469
U3	1516	620	1516	1428

Da fototriangulação, foram obtidas a posição e atitude da câmera ao tomar as diferentes imagens:

TABELA 6.4 – Posições e Atitudes da Câmera

IMAGEM	POSIÇÃO			ATITUDE		
	X0	Y0	Z0	ω	ϕ	κ
#1=> 32	12.098	1.390	55.818	8.00000	-0.00000	0.00000
#2=> 38	0.623	1.837	55.105	5.35057	-10.03934	0.97403
#3=> 41	23.717	0.812	56.292	6.85955	11.03006	-2.79327

A partir desses resultados, foi feito o cálculo da fototriangulação, de modo a dar geometria epipolar às imagens 32 e 38, escolhidas para formar o modelo estereoscópico, resultando, nos elementos de orientação, para o par de fotografias, como segue:

TABELA 6.5 – Posições e Atitudes da Câmera

Imagem	POSIÇÃO			ATITUDE		
	X0	Y0	Z0	Ω	ϕ	κ
#1=> 32	12.098	1.390	55.818	8.00000	-0.00000	2.24998
#2=> 38	0.618	1.390	55.042	5.75053	-10.13551	3.25726

Com esses elementos de orientação externa foi montado, pelo programa GeoCompiler© da GEOKOSMOS™, o modelo estereoscópico 32/38, do qual foram restituídas as árvores imageadas. Ver ilustração da restituição na figura 6.4 a seguir. Esta restituição permitiu posterior medição dos diâmetros e alturas, segundo o método de Huber, com o CAD da MicroStation da BENTLEY™.

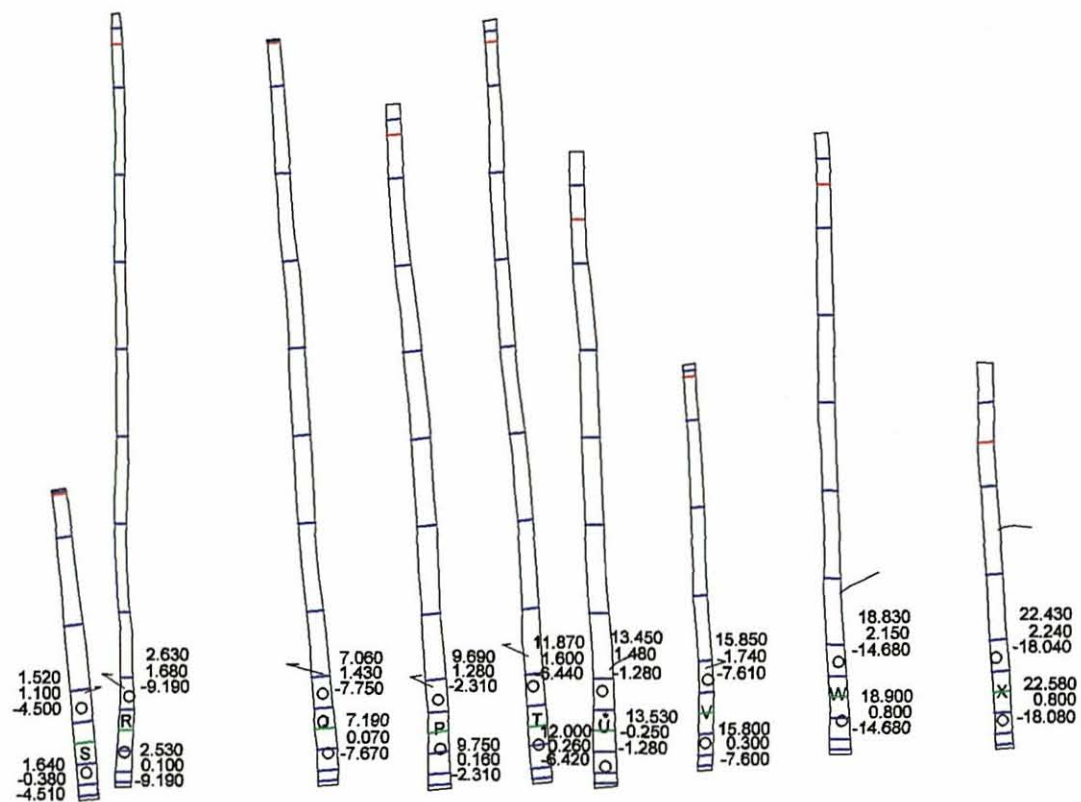


Figura 6.4 - Restituição do Experimento 2 - Pinus

Legenda

- Diâmetro no meio da seção
- Diâmetro na altura do peito (DAP)
- Início da última seção

s/escala

Volumes fotogramétricos:

As tabelas 6.6 até 6.17 têm na primeira linha o nome da árvore, na primeira coluna a altura de medida dos diâmetros, na segunda coluna o comprimento de cada seção, na terceira coluna o diâmetro de cada seção, na quarta coluna o volume e na última linha o volume total das seções acima.

TABELA 6.6 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore S (Método Fotogramétrico)

Árvore: S			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	47.4	0.018
0.34	0.48	46.4	0.081
0.82	0.48	46.4	0.081
1.30	0.48	47.4	0.085
1.77	0.46	47.4	0.081
2.50	1.00	46.4	0.169
4.00	2.00	42.4	0.282
6.00	2.00	35.2	0.195
7.06	0.11	34.2	0.010
Volume Total			1.002

TABELA 6.7 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore R (Método Fotogramétrico)

Árvore: R			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	38.0	0.011
0.34	0.48	38.0	0.054
0.82	0.48	36.0	0.049
1.30	0.48	34.0	0.044
1.77	0.46	33.0	0.039
2.50	1.00	29.0	0.066
4.00	2.00	25.0	0.098
6.00	2.00	27.0	0.115
8.00	2.00	27.0	0.115
10.00	2.00	27.0	0.115
12.00	2.00	25.0	0.098
14.00	2.00	22.0	0.076
16.00	2.00	25.0	0.098
17.36	0.71	23.0	0.030
Volume Total			1.007

TABELA 6.8 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore Q (Método Fotogramétrico)

Árvore Q			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	47.1	0.017
0.34	0.48	47.1	0.084
0.82	0.48	46.1	0.080
1.30	0.48	47.1	0.084
1.77	0.46	41.1	0.061
2.50	1.00	41.1	0.133
4.00	2.00	38.1	0.228
6.00	2.00	39.1	0.240
8.00	2.00	41.1	0.265
10.00	2.00	38.1	0.228
12.00	2.00	35.1	0.194
14.00	2.00	34.1	0.183
16.00	2.00	30.1	0.142
17.05	0.10	28.1	0.006
Volume Total			1.945

TABELA 6.9 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore P (Método Fotogramétrico)

Árvore: P			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	53.0	0.022
0.34	0.48	51.7	0.101
0.82	0.48	48.6	0.089
1.30	0.48	45.8	0.079
1.77	0.46	46.7	0.079
2.50	1.00	47.7	0.179
4.00	2.00	43.6	0.299
6.00	2.00	43.2	0.293
8.00	2.00	41.3	0.268
10.00	2.00	41.1	0.265
12.00	2.00	34.8	0.190
14.00	2.00	29.0	0.132
15.35	0.70	29.0	0.046
Volume Total			2.042

TABELA 6.10 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore U (Método Fotogramétrico)

Árvore: U			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	52.2	0.021
0.34	0.48	51.2	0.099
0.82	0.48	50.2	0.095
1.30	0.48	49.1	0.091
1.77	0.46	47.1	0.080
2.50	1.00	47.2	0.175
4.00	2.00	43.2	0.293
6.00	2.00	43.2	0.293
8.00	2.00	40.2	0.254
10.00	2.00	36.1	0.205
12.00	2.00	33.1	0.172
13.76	1.52	33.1	0.131
Volume Total			1.909

TABELA 6.11 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore T (Método Fotogramétrico)

Árvore: T			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	46.2	0.017
0.34	0.48	47.2	0.084
0.82	0.48	46.2	0.081
1.30	0.48	43.2	0.070
1.77	0.46	43.2	0.067
2.50	1.00	41.2	0.133
4.00	2.00	38.1	0.228
6.00	2.00	33.1	0.172
8.00	2.00	36.1	0.205
10.00	2.00	34.2	0.184
12.00	2.00	31.1	0.152
14.00	2.00	32.1	0.162
16.00	2.00	27.1	0.115
17.26	0.51	28.2	0.032
Volume Total			1.702

TABELA 6.12 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore V (Método Fotogramétrico)

Árvore: V			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	34.1	0.009
0.34	0.48	34.1	0.044
0.82	0.48	35.1	0.045
1.30	0.48	34.1	0.044
1.77	0.46	33.1	0.040
2.50	1.00	30.1	0.071
4.00	2.00	32.1	0.162
6.00	2.00	31.1	0.152
8.00	2.00	27.1	0.115
9.15	0.29	28.1	0.018
Volume Total			0.701

TABELA 6.13 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore W (Método Fotogramétrico)

Árvore: W			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	47.0	0.017
0.34	0.48	46.0	0.080
0.82	0.48	43.0	0.070
1.30	0.48	41.1	0.064
1.77	0.46	42.0	0.06
2.50	1.00	41.0	0.132
4.00	2.00	38.0	0.227
6.00	2.00	36.0	0.204
8.00	2.00	37.0	0.215
10.00	2.00	35.0	0.192
12.00	2.00	34.0	0.182
13.60	1.19	38.8	0.141
Volume Total			1.587

TABELA 6.14 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore X (Método Fotogramétrico)

Árvore: X			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	40.1	0.013
0.34	0.48	39.1	0.058
0.82	0.48	38.1	0.055
1.30	0.48	38.1	0.055
1.77	0.46	41.1	0.061
2.50	1.00	39.1	0.120
4.00	2.00	37.2	0.217
6.00	2.00	37.1	0.216
7.92	1.84	35.1	0.178
Volume Total			0.973

Cubagem pelo método de Huber relativa as Árvores Q, P e U:

TABELA 6.15 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore Q (Método de Huber)

Árvore: Q			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	52.7	0.022
0.34	0.48	48.0	0.087
0.82	0.48	47.2	0.084
1.30	0.48	44.1	0.073
1.77	0.46	43.6	0.069
2.50	1.00	42.7	0.143
4.00	2.00	41.0	0.264
6.00	2.00	39.4	0.244
8.00	2.00	39.2	0.241
10.00	2.00	35.4	0.197
12.00	2.00	33.3	0.174
14.00	2.00	32.8	0.169
16.00	2.00	32.0	0.161
17.05	0.10	30.6	0.007
Volume Total			1.935

TABELA 6.16 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore P (Método de Huber)

Árvore: P			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	55.7	0.024
0.34	0.48	52.3	0.103
0.82	0.48	48.6	0.089
1.30	0.48	47.9	0.087
1.77	0.46	46.8	0.079
2.50	1.00	46.8	0.172
4.00	2.00	43.3	0.294507
6.00	2.00	42.8	0.288
8.00	2.00	40.1	0.253
10.00	2.00	39.4	0.244
12.00	2.00	34.8	0.190
14.00	2.00	32.8	0.169
15.35	0.70	31.9	0.056
Volume Total			2.048

TABELA 6.17 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore U (Método de Huber)

Árvore: U			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	58.2	0.027
0.34	0.48	53.6	0.108
0.82	0.48	49.3	0.092
1.30	0.48	48.8	0.090
1.77	0.46	49.8	0.0916
2.50	1.00	46.6	0.171
4.00	2.00	43.2	0.293
6.00	2.00	41.2	0.267
8.00	2.00	41.3	0.268
10.00	2.00	36.2	0.206
12.00	2.00	31.6	0.157
13.76	1.52	30.5	0.111
Volume Total			1.878

6.3.4. Experimento 3 – Araucárias

A mesma técnica descrita para o experimento 1 foi repetida. Ver imagens 47, 52 e 57, relativas as figuras 6.5, 6.6 e 6.7. As coordenadas medidas das imagens são conforme consta nas tabelas 6.18 a 6.20.



Figura 6.5 - Imagem 47 – Experimento 3 - Araucárias



Figura6.6 - Imagem 52 – Experimento 3 - Araucárias



Figura 6.7 - Imagem 57- Experimento 3 - Araucárias

A primeira coluna das tabelas em epígrafe traz o nome do ponto, constituído por uma letra que designa a árvore e um número que designa o ponto naquela árvore. As colunas 2 e 3 trazem as coordenadas de “bitmap” dos pontos descritos e as colunas 4 e 5 as coordenadas dos mesmos pontos no sistema de referência fotogramétrico digital. As unidades das coordenadas são o pixel.

TABELA 6.18 – Coordenadas da Imagem 47

Imagem 47D	f=80	A=5.6	direita	
Ponto	X'	Y'	X	Y
A1	159	1887	159	161
A2	102	69	102	1979
B1	686	1955	686	93
B2	672	300	672	1748
C1	994	1983	994	65
C2	1053	418	1053	1630
D1	1862	1944	1862	104
D2	1833	832	1833	1216

TABELA 6.19 – Coordenadas da Imagem 57

Imagem 57C	f=80	A=5.6	esquerda	
Ponto	X'	Y'	X	Y
A1	497	1778	497	270
A2	465	60	465	1988
B1	806	1847	806	201
B2	813	281	813	1767
C1	995	1876	995	172
C2	1078	398	1078	1650
D1	1803	1857	1803	191
D2	1796	829	1796	1219

TABELA 6.20 – Coordenadas da Imagem 52

Imagem 52E	f=80	a=5.6	esquerda	
Ponto	X'	Y'	X	Y
A1	826	1919	826	129
A2	768	308	768	1740
B1	951	1974	951	74
B2	926	493	926	1555
C1	1036	1996	1036	52
C2	1086	594	1086	1454
D1	1783	1963	1783	85
D2	1756	1003	1756	1045

Da fototriangulação, foram obtidos os seguintes resultados:

TABELA 6.21 – Posições e Atitudes da Câmera

Imagem	POSIÇÃO			ATITUDE		
	X0	Y0	Z0	Ω	φ	κ
#1=> 57	10.000	1.425	44.400	6.00000	-0.00000	0.00000
#2=> 47	15.700	1.162	41.429	7.38637	7.58438	-2.42087
#3=> 52	3.941	1.777	46.624	6.99145	-7.08757	0.13199

Da mesma forma que no experimento 2, a partir desses resultados, foi refeito o cálculo da fototriangulação, de modo a dar geometria epipolar às imagens 57 e 47, escolhidas para formar o modelo estereoscópico, resultando, nos elementos de orientação, para o par de fotografias, como segue:

TABELA 6.22 – Posições e Atitudes da Câmera

Imagem	POSIÇÃO			ATITUDE		
	X0	Y0	Z0	Ω	φ	κ
#1=> 57	10.000	1.425	44.400	6.00000	-0.00002	2.65000
#2=> 47	15.721	1.425	41.456	7.03212	7.63944	0.25221

Na estação Digital da GEOKOSMOS, com o programa GeoCompiler, foi formado o modelo 57/47, com o qual foram restituídas as árvores desejadas em CAD da BENTLEY, para posterior medição de diâmetros e alturas para o cálculo de volume. Ver ilustração da restituição na figura 6.8 a seguir.

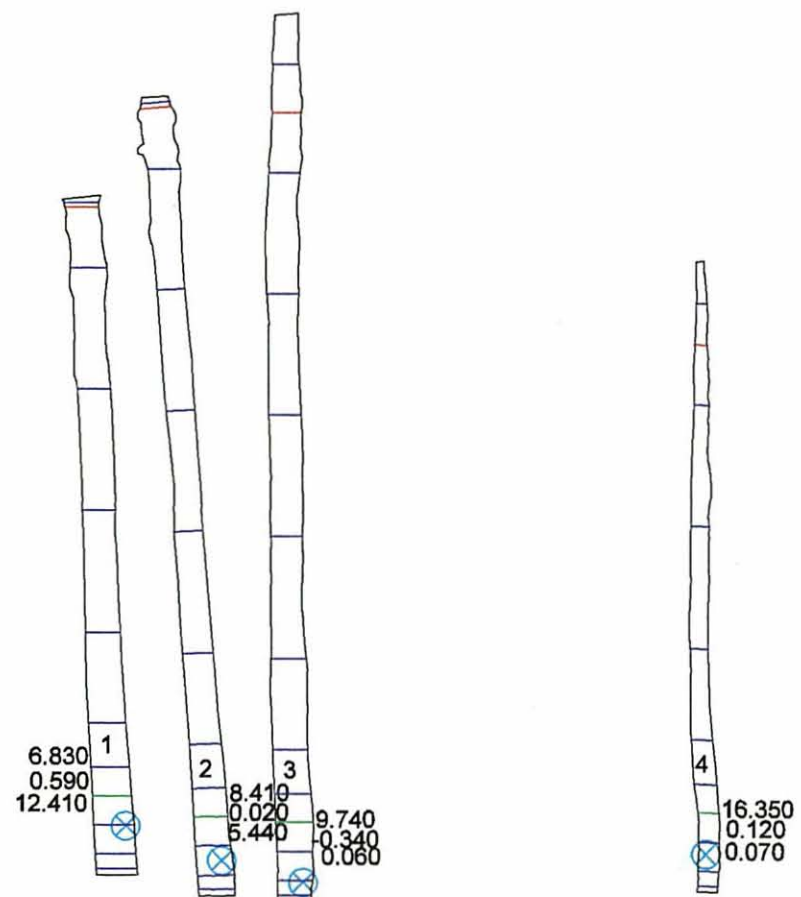


Figura 6.8 - Restituição do Experimento 3 - Araucárias

Legenda

- Diâmetro no meio da seção
- Diâmetro na altura do peito (DAP)
- Início da última seção

s/escala

As tabelas 6.23 até 6.26 têm na primeira linha o nome da árvore, na primeira coluna a altura de medida dos diâmetros, na segunda coluna o comprimento de cada seção, na terceira coluna o diâmetro de cada seção, na quarta coluna o volume e na última linha o volume total das seções acima.

Volumes Fotogramétricos:

TABELA 6.23 –Cálculo de Volume Relativo a Árvore 1 (Método Fotogramétrico)

Árvore: 1			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	67.0	0.035
0.34	0.48	67.0	0.169
0.82	0.48	67.1	0.170
1.30	0.48	64.0	0.154
1.77	0.46	64.0	0.148
2.50	1.00	61.0	0.292
4.00	2.00	57.0	0.510
6.00	2.00	55.0	0.475
8.00	2.00	54.0	0.458
10.00	2.00	60.1	0.567
11.081	0.16	57.0	0.041
Volume Total			3.021

TABELA 6.24 –Cálculo de Volume Relativo a Árvore 2 (Método Fotogramétrico)

Árvore : 2			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	61.8	0.030
0.34	0.48	61.7	0.144
0.82	0.48	59.6	0.134
1.30	0.48	57.7	0.126
1.77	0.46	56.8	0.117
2.50	1.00	53.7	0.227
4.00	2.00	51.6	0.418
6.00	2.00	48.7	0.373
8.00	2.00	47.6	0.356
10.00	2.00	46.6	0.341
12.00	2.00	56.6	0.503
13.09	0.18	47.8	0.032
Volume Total			2.800

TABELA 6.25 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore 3 (Método Fotogramétrico)

Árvore: 3			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	61.7	0.030
0.34	0.48	63.1	0.150
0.82	0.48	66.2	0.165
1.30	0.48	68.4	0.176
1.77	0.46	66.2	0.158
2.50	1.00	64.0	0.322
4.00	2.00	64.0	0.643
6.00	2.00	59.0	0.547
8.00	2.00	57.2	0.514
10.00	2.00	59.5	0.556
12.00	2.00	57.2	0.514
13.81	1.62	47.0	0.281
Volume Total			4.057

TABELA 6.26 – Cálculo de Volume Relativo a Árvore 4 (Método Fotogramétrico)

Árvore: 4			
Altura (m)	Comp (m)	Diâmetro (cm)	Volume (m ³)
0.10	0.10	35.5	0.010
0.34	0.48	35.2	0.047
0.82	0.48	34.5	0.045
1.30	0.48	36.4	0.050
1.77	0.46	38.7	0.054
2.50	1.00	35.2	0.097
4.00	2.00	32.3	0.164
6.00	2.00	29.1	0.133
8.00	2.00	26.0	0.106
9.68	1.36	17.7	0.034
Volume Total			0.740

6.4. CUBAGEM DAS ÁRVORES FOTOGRAFADAS

Após fotografar as árvores (*Pinus elliottii*), conforme descrito no item 6.3.2., três foram derrubadas para fazer a cubagem. Possibilitando assim o estudo comparativo de volume obtido fotogrametricamente com o de cubagem.

O método de cubagem de árvores escolhido foi o de HUBER. Esta escolha deve-se ao fato de ter sido realizado na área de estudo, isto é, na Fazenda Experimental do Canguiri, estudos de comparação de métodos de cubagem de árvores. Os melhores resultados encontrados foram com o Método de Huber. Ver MACHADO et al. (1991).

O volume pela fórmula de Huber é obtido pelo produto da área seccional tomada na metade da seção e o comprimento da seção, conforme explica com mais detalhes item 2.2.3.

$$V = g_i \cdot L$$

onde:

V = volume da seção

g_i = área seccional tomada no meio da seção

L = comprimento da seção

Neste experimento foram tomadas medidas de 3 secções de 0,48m de comprimento cada uma, com seus respectivos diâmetros centrais a 0,34m de altura, a 0,82m e a 1,30m ; uma seção de 0,34m de comprimento, com seu respectivo diâmetro central a 1,77m; uma seção de 1,00m de comprimento, com seu diâmetro central a 2,50m de altura, e as demais seções com 2,0m de comprimento cada uma, sempre com os diâmetros medidos no meio de cada seção, portanto a 2,00m, 4,00 m, 6,00m e assim por diante, conforme o método de Huber.

O volume da cubagem das árvores Q, P e U, das mesmas seções que foram medidas nas imagens estão nas tabelas 6.8, 6.9 e 6.10 respectivamente.

6.5. VOLUME CALCULADO COM MEDIDAS FOTOGRAFAMÉTRICAS DAS ÁRVORES

Para ser possível realizar comparações não tendenciosas, o mesmo método (Método de Huber) foi aplicado tanto para os dados fotogramétricos quanto para a cubagem.

Para estudos futuros pode ser calculado o fator de forma, usando Métodos de Análise de Regressão Linear ou ainda Funções Spline, para a área em estudo, levando em conta a facilidade de obter diversos diâmetros e comprimentos nas imagens digitais.

6.5.1. Comparação Direta do Método Fotogramétrico com o da Cubagem

Com o objetivo de testar a qualidade dos resultados obtidos por via fotogramétrica, foram comparados os volumes de árvores em pé, pelo método fotogramétrico com o volume determinado nas mesmas depois de abatidas com medições diretas, seguindo, em ambos os casos a metodologia de Huber. As medições para a cubagem, tomada como referência, foram realizadas para toda a extensão da árvore, mas a comparação ficou restrita à altura da árvore que o método fotogramétrico permitiu restituir, em face dos obstáculos que a ramagem oferece à visão estereoscópica. No item 6.5.2 foi dado um tratamento para extrapolar o volume obtido via método fotogramétrico nas mesmas três árvores em epígrafe, até um diâmetro desejado.

Três árvores foram abatidas para a cubagem: a árvore P que foi restituída até a altura de 15,35 m; a árvore Q que foi restituída até a altura de 17,05m e a U que foi restituída até a altura de 13,76m. A comparação dos resultados mostrados a seguir provam a alta qualidade do método fotogramétrico.

Com este experimento, as comparações de volumes calculados com medidas fotogramétricas com os resultados da cubagem pelo método de Huber, foi o seguinte:

Para a árvore P: Volume fotogramétrico = $2,042 \text{ m}^3$

Volume cubado = $2,048 \text{ m}^3$

Diferença = 0,29 % ($0,006 \text{ m}^3$)

Para a árvore Q: Volume fotogramétrico = $1,945 \text{ m}^3$

Volume cubado = $1,935 \text{ m}^3$

Diferença = 0,52% ($0,010 \text{ m}^3$)

Para a árvore U: Volume fotogramétrico = $1,909 \text{ m}^3$

Volume cubado = $1,878 \text{ m}^3$

Diferença = 1,65% ($0,031 \text{ m}^3$)

Observa-se que para cálculo de volumes em povoamentos, o método fotogramétrico com câmeras digitais calibradas é muito eficiente, rápido, barato e não tem a necessidade de derrubar árvores para ter estes resultados tão significativos.

Para maiores detalhes ver item 6.1.3.

6.5.2. Comparação dos Volumes Fotogramétrico Extrapolado com o Cubado

É sempre desejável conhecer o volume comercial de uma árvore e não apenas o volume mensurável pelo critério do que é visível. Existem várias definições de altura comercial, dependendo do uso que se pretende dar para a árvore em epígrafe, por exemplo, para celulose, o diâmetro mínimo pode ser de 8 cm e para serraria, 15 cm. Desta forma, é conveniente desenvolver uma fórmula que permita a escolha do diâmetro mínimo para atender ao critério selecionado. Para este trabalho, desenvolveu-se a seguinte fórmula para a avaliação do volume não medido:

A altura da árvore para o diâmetro mínimo D_f escolhido é dada por:

$$h_f = 4 + (h_u - 4) \frac{D_u - D_f}{D_4 - D_u} \quad , \quad (6.1)$$

e para a altura total restituída:

$$h_b = h_u + 0,5C \quad e \quad (6.2)$$

o diâmetro nessa altura:

$$D_b = D_4 - (D_4 - D_u) \frac{h_b - 4}{h_u - 4} \quad (6.3)$$

onde:

C = altura da última seção restituída;

h_f = altura correspondente ao diâmetro mínimo escolhido;

h_u = altura do último diâmetro medido fotogrametricamente;

h_b = altura total restituída

D_b = diâmetro no final da última seção restituída;

D_u = último diâmetro medido fotogrametricamente;
 D_f = diâmetro final (ou seja, diâmetro mínimo escolhido);
 D_4 = diâmetro medido fotogrametricamente na altura de 4 metros.

O volume não medido V^+ a ser estimado é dado por:

$$V^+ = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_b + D_f}{2} \right)^2 (h_f - h_b) \quad (6.4)$$

onde:

V^+ = volume extrapolado.

O volume final procurado:

$$V_T = V_f + V^+ \quad (6.5)$$

onde

V_T = volume total procurado

V_f = volume obtido pelas mensurações fotogramétricas

V^+ = volume não medido (extrapolado)

As tabelas 6.27 até 6.29 têm na primeira coluna a altura de medida dos diâmetros, na segunda coluna o comprimento de cada seção, na terceira coluna o diâmetro de cada seção, na quarta coluna o volume e na última linha o volume total das seções acima.

Resultados:

a. Para a árvore P:

TABELA 6.27. Cálculo de Volume Relativo a Árvore P (Método de Huber)

altura	Comp	diâmetro	Volume
0.10	0.10	55.7	0.024
0.34	0.48	52.3	0.103
0.82	0.48	48.6	0.089
1.30	0.48	47.9	0.087
1.77	0.46	46.8	0.079
2.50	1.00	46.8	0.172
4.00	2.00	43.3	0.295
6.00	2.00	42.8	0.288
8.00	2.00	40.1	0.253
10.00	2.00	39.4	0.244
12.00	2.00	34.8	0.190
14.00	2.00	32.8	0.169
15.35	0.70	31.9	0.056
16.70	2.00	28.3	0.126
18.70	2.00	24.7	0.096
20.70	2.00	21.8	0.075
22.70	2.00	15.2	0.036
Volume total			2.381

$V_T = 2,04 + 0,39 = 2,43 \text{ m}^3$ (Calculado pela fórmula 6.5, que é volume calculado pelo método fotogramétrico, mais o volume extrapolado)

$V_C = 2,38 \text{ m}^3$ (volume cubado)

Diferença: 2,10% (-0,05m³)

b. Para a árvore Q:

TABELA 6.28. Cálculo de Volume Relativo a Árvore Q (Método de Huber)

Altura	Comp	diâmetro	Volume
0.10	0.10	52.7	0.021
0.34	0.48	48.0	0.087
0.82	0.48	47.2	0.084
1.30	0.48	44.1	0.073
1.77	0.46	43.6	0.069
2.50	1.00	42.7	0.143
4.00	2.00	41.0	0.264
6.00	2.00	39.4	0.244
8.00	2.00	39.2	0.241
10.00	2.00	35.4	0.197
12.00	2.00	33.3	0.174
14.00	2.00	32.8	0.169
16.00	2.00	32.0	0.161
17.05	0.10	30.6	0.007
18.10	2.00	28.8	0.130
20.10	2.00	25.2	0.100
22.10	2.00	23.6	0.088
24.10	2.00	17.6	0.049
26.10	2.00	12.2	0.023
Volume Total			2.325

$V_T = 1,94 + 0,52 = 2,46 \text{ m}^3$ (Calculado pela fórmula 6.5, que é volume calculado pelo método fotogramétrico, mais o volume extrapolado)

$V_C = 2,33 \text{ m}^3$ (volume cubado)

Diferença 5.56% (-0,13 m^3)

c. Para a árvore U:

TABELA 6.29. Cálculo de Volume Relativo a Árvore U (Método de Huber)

altura	Comp	Diâmetro	Volume
0.10	0.10	58.2	0.027
0.34	0.48	53.6	0.108
0.82	0.48	49.3	0.091
1.30	0.48	48.8	0.090
1.77	0.46	49.8	0.090
2.50	1.00	46.6	0.171
4.00	2.00	43.2	0.293
6.00	2.00	41.2	0.267
8.00	2.00	41.3	0.268
10.00	2.00	36.2	0.206
12.00	2.00	31.6	0.157
13.76	1.52	30.5	0.111
15.52	2.00	23.8	0.089
17.52	2.00	17.2	0.047
19.52	2.00	13.4	0.028
Volume Total:			2.042

$V_T = 1,91 + 0,35 = 2,26 \text{ m}^3$ (Calculado pela fórmula 6.5, que é volume calculado pelo método fotogramétrico, mais o volume extrapolado)

$V_C = 2,04 \text{ m}^3$ (volume cubado)

Diferença: 10,29% (-0,21 m^3)

7. CONCLUSÕES

7.1. CONCLUSÕES RELATIVAS A CALIBRAGEM

O Método das Câmeras Convergentes, criado por Duanne Brown, utilizado neste trabalho, tem consistência muito elevada em virtude de sua geometria muito forte, onde força solução com imagens tomadas com ângulos opostos, isto é, com convergência angular e rotação em torno do eixo óptico. Calibra-se uma câmera com o mínimo de injunções (sete) necessárias para definir um referencial. Por isso, não é necessário efetuar medições no espaço objeto. O método baseia-se na intersecção de feixes perspectivos convergentes. Assim, basta fixar a posição e atitude da câmera numa das posições em que foi tomada uma foto e adotar uma distância, seja entre pontos da rede de alvos, seja entre duas posições ocupadas pela câmera.

A qualidade da calibragem, quando as fotos são tomadas segundo as especificações do método, dependem apenas da qualidade das coordenadas fotogramétricas.

Em virtude da geometria muito forte do método, a detecção de erros é muito fácil. Num ajustamento normal, sem qualquer tipo de filtro, os resíduos mostram claramente os pontos que devem ser medidos novamente por conter erros.

Por tratar-se de leitura realizada em meio digital, esta pode ser feita com muita rapidez e facilidade no mesmo computador que processa a calibragem.

Assim, em resumo, o uso da câmera digital mostrou claramente que:

- A precisão das medidas de coordenadas digitais tem como fator limitante a resolução da imagem. Isto significa que, o erro de pontaria, tomando o pixel vizinho, pode acarretar um erro limite de 1,5 pixel. Nas

experiências, não houve nenhum resíduo que alcançasse esse valor.

A experiência mostrou, ainda, que nas condições em que as calibrações foram conduzidas (alvos artificiais), o erro padrão do conjunto de mensurações está em torno de 0,35 pixel – valor que foi adotado no ajustamento como erro padrão das coordenadas fotogramétricas digitais lidas;

- A precisão não depende de instrumento de leitura;
- Imagens digitais são muito mais fáceis de manipular que imagens analógicas;
- Na imagem digital é inexistente o problema da mudança de posição de pontos da imagem como ocorre nos filmes – trabalho do filme.
- A imagem digital mantém-se ao longo do tempo com a mesma qualidade, podendo ser guardada por tempo indeterminado, quando copiadas com a frequência adequada.
- O método de calibração das câmeras convergentes possui geometria muito forte, sugerindo que, em levantamentos terrestres, a mesma geometria seja utilizada, podendo-se, caso hajam pontos identificáveis em quantidade suficiente, fazer a calibração simultânea com o trabalho de levantamento.
- Em virtude de que, tanto as leituras de coordenadas fotogramétricas digitais, quanto o processamento do feixe perspectivo de raios, num processo de fototriangulação ou de calibração, são realizados em ambiente de computador pessoal, o que torna os processos dinâmicos, sempre com todos os dados e recursos a mão, garantindo rapidez e qualidade.

7.2. CONCLUSÕES RELATIVAS À MEDIDAS DENDROMÉTRICAS

- O erro padrão nas coordenadas fotogramétricas digitais em feições naturais foi de 0,70 pixel – o dobro do valor conseguido para alvos

artificiais (0,35 pixel). No terreno, no experimento 2, esse valor corresponde a 0,8 cm.

- Ao processar a fototriangulação, torna-se fácil a remediação de pontos com resíduos muito altos.
- A experiência de processar a fototriangulação apenas com o par de imagens escolhida para montagem do modelo estereoscópico, mostrou resultados mais pobres, com impossibilidade de detecção de erros grosseiros. Assim, para resultados mais consistentes, um mínimo de três imagens torna-se necessário.
- Quando uma das imagens do par estereoscópico de uma árvore, como ocorreu com a árvore U, fica parcialmente obstruída por outra no exame estereoscópico na estação digital, é possível fazer a restituição monoscópicamente com a imagem visível, desde que se possa colocar o valor de Z correspondente àquela árvore no “mouse” tridimensional. É o mesmo princípio da restituição monoscópica. Veja MITISHITA (1998)
- A restituição tridimensional permite que em CAD sejam feitas qualquer tipo de mensuração. Isto permitiu adotar o método de Huber no processo fotogramétrico. Qualquer outro método poderia ser utilizado.
- A precisão do método fotogramétrico é da ordem de 1% do volume calculado por cubagem.
- A precisão do método fotogramétrico com extrapolação para um diâmetro arbitrado foi de 2,10%, 5,56% e 10,29%. Este último valor foi na árvore U que apresentou anomalias de forma e teve parte de sua imagem estereoscópica obstruída.
- A medida das distâncias entre os pares de alvos colocados em cada árvore no experimento 2 facilitou a determinação de valores aproximados para o programa de fototriangulação.
- A medida da distância entre o alvo inferior e a base da árvore permitiu extrapolar a restituição para a parte encoberta pelo capim.

7.2.1. Recomendações

- A base estereoscópica pode ser menor do que a utilizada (11m) sem prejuízo da visão estereoscópica e da precisão. Base de 5m, para a distância adotada entre a câmera aos alvos deve ser suficiente.
- Câmeras com distância focal menor (35mm) seriam desejáveis, pois, a uma distância curta permitiriam tomar imagens das árvores inteiras.
- O uso de alvos circulares dentro de quadrados com contraste do preto pra o branco, bem como a colocação de cartazes com letras para denominar as árvores facilita todo o trabalho.
- Envolver a árvore com uma fita com 5 ou 6 cm de largura na altura de peito também ajuda as medições.

8. REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. Bittencourt e MAGRO, Francisco H. S. (1995). **Calibração de uma Câmera de Vídeo S-VHS**. Revista de Pesquisas. Instituto de Geociências. UFRGS. Porto Alegre. R.S.
- _____. (1999). **Fotogrametria**. Editora SBEE. Curitiba, PR.
- _____. e OLIVAS, M. A. A. (1981). **Calibração de Câmeras Aerofotogramétricas**. Boletim da Universidade Federal do Paraná. GEODÉSIA # 26. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, Paraná.
- _____. ; BÄHR, H. P.; OLIVAS, M. A. A. (1982). **Calibration and Resolution Test of Rollei-SLX Réseau Camera**. INTERNATIONAL SYMPOSIUM, COMMISSION I OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. Camberra. Austrália.
- AVERY Thomas E. and BURKHART, Harold E. (1983). **Forest Measurements**. McGraw-Hill Book Company Inc. USA.
- BENDER, Lee U. (1970). **An Algorithm for Gridding Satellite Photographs**. Reports of the Department of Geodetic Science. Report # 135. The Ohio State University. Columbus, Ohio. USA.
- BENDER, Lee U. (1971). **Analytical Photogrammetry:: A Collinear Theory**. Reports of the Department of Geodetic Science. Report # 154. The Ohio State University. Columbus, Ohio. USA.
- BROWN, Duane C. (1964). **An Advanced Reduction in Calibration for Photogrammetric Cameras**. Air Force Cambridge Research Laboratories. Office of Aerospace Research. United State Air Force. Bedford, Massachussts. USA
- _____. (1966). **Decentering Distortion of Lenses**. Photogrammetric Engineering, Vol. XXXII, # 3. USA.
- _____. (1969). **Advanced Methods for the Calibration of Metric Cameras**. Symposium of Computational Photogrammetry at Syracuse University, College of Forestry .USA
- _____. (1977) **Evolution and Future of Analytical Photogrammetry. International Symposium titled "The Changing World of Geodetic Science**. Editor: Urho A. Uotila. Reports of Department of Geodetic Science. Report # 250. The Ohio State University. Columbus, Ohio. USA.
- CHAPMAN, Herman H. and MEYER Walter H. (1949). **Forest Mensuration**. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York. USA.

- CONRADY, A. E. (1919). **Decentred Lens System**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 79: 384-390.
- EISENHART, Churchill (1963). **Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration System**. Journal of Research of the National Bureau of Standards. C. Engineering and Instrumentation. 67c(2): 161-87. Apr./Jun. 1963.USA.
- ELPHINSTONE, Gerald M. (1975). **Simultaneous Adjustment of Photogrammetric and Geodetic Observations**. Ph.D. Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign. USA.
- GEMAEL, Camil (1994) **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Editora da UFPR. Curitiba, PR.
- HUSCH, Bertram; MILLER, C. I.; BEERS, T.W. (1982). **Forest Mensuration**. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- KENEFICK, John F. (1971). **Ultra-Precise Analytical Stereotriangulation for Structural Measurements**. Symposium on Close Range Photogrammetry. American Society of Photogrammetry. University of Illinois, Urbana, Illinois. USA.
- MACHADO, Sebastião A. e NADOLNY Maurício C. (1991) **Comparação de Métodos de Cubagem de Árvores e de Diversos Comprimentos de Seção**. Anais do III Congresso Florestal e do Meio Ambiente do Paraná. Volume I – Trabalhos Voluntários. Curitiba, PR.
- MERCHANT, Dean C. (1971). **An Investigation into the Dynamic Aerial Photographic System Calibration**. Reports of the Department of Geodetic Science. Report # 153. The Ohio State University. Columbus, Ohio. USA.
- _____. (1979). **Analytical Photogrammetry – Theory and Practice. Part I**. Department of Geodetic Science. The Ohio State University. Columbus, Ohio.
- _____. (1980). **Analytical Photogrammetry – Theory and Practice. Part II**. Department of Geodetic Science. The Ohio State University. Columbus, Ohio.
- _____. (1980). **Applied Research in Analytical Photogrammetry**. Reports of the Department of Geodetic Science. Report # 304. Department of Geodetic Science. The Ohio State University. Columbus, Ohio, USA.
- MITISHITA, Edson A. (1997) **Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D., para Fins de Mapeamento na Área Florestal**. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Setor de Ciências Agrárias. UFPR.

PHILIP, Michael S. (1994). **Measuring Trees and Forests**. CAB International. UK.

PRODAN, Michail, PETERS, Roland; COX, Fernando; REAL, Pedro (1997). **Mensura Florestal**. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.

SOLER, Tomas (1971) **Precise Star Updating in Stellar Camera Calibration**. M.Sc. Thesis. Department of Civil Engineering. University of Washington. Washington. USA.

UOTILA, Urho (1967) **Introduction to Adjustment Computations with Matrices**. Unpublished Notes, Department of Geodetic Science. The Ohio State University. Columbus, Ohio. USA.

ANEXO I – PROCESSAMENTO DA CALIBRAGEM PARA OBJETIVA DE 55mm

DADOS DE ENTRADA

INPUT PASS POINT COORDINATES AND
VARIANCES

PT#	PONTO	COD	X	Y	Z
1	A	0	0.0200	3.1100	0.0000
2	B	0	0.8000	2.8500	0.0000
3	C	0	1.6100	2.9650	0.0000
4	D	0	3.0000	3.0900	0.0000
5	E	0	0.2000	2.4500	0.0000
6	F	0	1.0750	2.3000	0.0000
7	G	0	1.6500	2.4500	0.0000
8	H	0	2.1100	2.0750	0.0000
9	I	0	2.6900	2.2800	0.0000
10	J	0	3.2700	2.3250	0.0000
11	K	0	0.7600	1.9550	0.0000
12	L	0	1.3250	1.7850	0.0000
13	M	0	2.1100	2.0750	0.0000
14	N	0	2.0000	1.5730	0.0000
15	O	0	2.6250	1.7150	0.0000
16	P	0	3.2900	1.6930	0.0000
17	Q	0	0.0200	1.3550	0.0000
18	R	0	0.7700	1.0650	0.0000
19	S	0	1.6350	1.2050	0.0000
20	T	0	2.6250	0.9350	0.0000
21	U	0	3.4300	1.2050	0.0000
22	V	0	0.1850	0.5700	0.0000
23	X	0	1.2450	0.5450	0.0000
24	Y	0	1.9400	0.4200	0.0000
25	Z	0	3.0100	0.5600	0.0000

INPUT DATA: P+OTO#1 0003

		VARIANCE
Omega =	3.27	0.000100
Phi =	-1.04	0.000100
Kappa =	0.77	0.000100
XC =	1.60	0.000010
YC =	1.19	0.000010
ZC =	6.23	0.000010

PHOTO COORDINATES		
POINT	X	Y
1	21.0000	1934.0000
2	453.0000	1792.0000
3	951.0000	1863.0000
4	1747.0000	1929.0000
5	126.0000	1557.0000
6	636.0000	1483.0000
7	964.0000	1563.0000
8	1383.0000	1709.0000
9	1583.0000	1467.0000
10	1906.0000	1492.0000
11	350.0000	1277.0000
12	773.0000	1180.0000
13	1233.0000	1344.0000
14	1171.0000	1053.0000
15	1540.0000	1139.0000
16	1924.0000	1126.0000
18	446.0000	751.0000
19	962.0000	835.0000
20	1547.0000	673.0000
21	2016.0000	839.0000
22	105.0000	459.0000
23	733.0000	445.0000
24	1146.0000	367.0000
25	1774.0000	460.0000

INPUT DATA: PHOTO#2 0005

VARIANCE

Omega =	3.09
Phi =	-1.61
Kappa =	90.46
XC =	1.65
YC =	1.30
ZC =	6.24

PHOTO COORDINATES		
POINT	X	Y
2	1736.0000	1666.0000
3	1808.0000	1168.0000
4	1878.0000	373.0000
5	1499.0000	1994.0000
6	1427.0000	1481.0000
7	1508.0000	1153.0000
8	1656.0000	736.0000
9	1415.0000	535.0000
10	1441.0000	213.0000
11	1219.0000	1767.0000

12	1124.0000	1343.0000
13	1290.0000	884.0000
14	999.0000	945.0000
15	1088.0000	577.0000
16	1077.0000	194.0000
18	693.0000	1667.0000
19	780.0000	1152.0000
20	622.0000	567.0000
21	791.0000	101.0000
22	397.0000	2008.0000
23	388.0000	1379.0000
24	314.0000	966.0000
25	411.0000	340.0000

INPUT DATA: PHOTO#3 0011

VARIANCE

Omega =	1.66
Phi =	33.42
Kappa =	0.40
XC =	6.19
YC =	1.47
ZC =	6.44

PHOTO COORDINATES

POINT	X	Y
1	356.0000	1625.0000
2	592.0000	1549.0000
3	895.0000	1641.0000
4	1466.0000	1773.0000
5	410.0000	1359.0000
6	697.0000	1325.0000
7	902.0000	1401.0000
8	1188.0000	1548.0000
9	1333.0000	1354.0000
10	1589.0000	1395.0000
11	530.0000	1160.0000
12	777.0000	1094.0000
13	1078.0000	1236.0000
14	1032.0000	997.0000
15	1295.0000	1072.0000
16	1596.0000	1065.0000
17	343.0000	902.0000
18	581.0000	771.0000
19	892.0000	824.0000
20	1293.0000	676.0000
21	1669.0000	806.0000
22	393.0000	569.0000
23	747.0000	529.0000

24	1008.0000	445.0000
25	1465.0000	480.0000

INPUT DATA: PHOTO#4 0015

VARIANCE

```

Omega =      5.68
Phi   =     -40.40
Kappa =      3.26
XC    =     -3.23
YC    =      1.09
ZC    =      5.77

```

PHOTO COORDINATES

POINT	X	Y
1	287.0000	1851.0000
2	630.0000	1659.0000
3	970.0000	1660.0000
4	1428.0000	1630.0000
5	380.0000	1481.0000
6	766.0000	1369.0000
7	983.0000	1411.0000
8	1232.0000	1494.0000
9	1346.0000	1294.0000
10	1513.0000	1294.0000
11	561.0000	1205.0000
12	863.0000	1101.0000
13	1150.0000	1217.0000
14	1117.0000	986.0000
15	1327.0000	1045.0000
16	1527.0000	1026.0000
17	289.0000	888.0000
18	642.0000	732.0000
19	992.0000	809.0000
20	1338.0000	689.0000
21	1576.0000	817.0000
22	381.0000	450.0000
23	848.0000	475.0000
24	1111.0000	433.0000
25	1460.0000	534.0000

OBSERVED DISTANCES AND VARIANCES

FROM	TO	DISTANCE	VARIANCE
7 23		1.940	0.0001

CAMERA CALIBRATION CONSTANTS

		VARIANCE
F =	3666.6700	100000.0000
X =	1024.0000	100000.0000
Y =	1024.0000	100000.0000

Minimum Iterations = 3

Maximum Iterations = 7

Angular Convergence = 2.0000E-0001

Calibration Convergence = 1.0000E+0002

Coordinate Convergence = 1.0000E-0001

A priori variance of unit weight = 1.0000E+0000

Photo Coordinate Variance = 1.2250E-0001

RELATÓRIO DE SAÍDA

Thursday, Nov 16, 2000 12:07:37

Converged in 6 iterations

A priori variance of Unit Weight = 1.00000

A posteriori variance of Unit Weight = 1.04062

Computed Chi Squared = 106.14352

Degrees of Freedom = 102

PHOTO #1=> 0003

XC = 1.603

YC = 1.187

ZC = 6.229

Omega = 3.26730

Phi = -1.03532

Kappa = 0.77052

Residuals (pixel)

PT#	Point	VX	VY
1	A!!	-0.050	0.804
2	B!!	0.250	0.877
3	C!!	0.250	0.467
4	D!!	1.175	1.237
5	E!!	-0.281	0.898
6	F!!	0.433	0.962
7	G!!	0.883	0.380
8	H!!	0.498	0.619
9	I!!	0.985	0.665
10	J!!	1.244	0.594
11	K!!	-0.121	0.282
12	L!!	-0.100	0.309
13	M!!	0.381	0.642
14	N!!	0.004	0.445
15	O!!	0.504	0.899
16	P!!	0.883	0.630
18	R!!	0.475	0.449
19	S!!	0.140	0.090
20	T!!	0.748	0.565
21	U!!	1.188	0.607
22	V!!	-0.127	-0.601
23	X!!	0.164	-0.281
24	Y!!	-0.075	0.315
25	Z!!	0.926	0.050

PHOTO #2=> 0005

XC = 1.426
YC = 1.089
ZC = 6.213
Omega = 3.13930
Phi = -1.81502
Kappa = 90.51405

Residuals (pixel)

PT#	Point	VX	VY
2	B!!	0.821	1.173
3	C!!	1.185	0.734
4	D!!	0.491	0.366
5	E!!	0.881	0.586
6	F!!	0.843	0.947
7	G!!	0.730	0.647
8	H!!	0.653	0.132
9	I!!	0.574	0.063
10	J!!	0.865	0.194
11	K!!	0.423	1.010
12	L!!	0.357	0.693
13	M!!	1.038	0.238
14	N!!	0.560	0.028
15	O!!	-0.053	-0.199
16	P!!	-0.253	-0.067
18	R!!	0.116	1.080
19	S!!	0.031	0.490
20	T!!	0.408	0.155
21	U!!	0.004	-0.222
22	V!!	0.312	0.776
23	X!!	0.086	0.215
24	Y!!	-0.257	0.304
25	Z!!	-0.058	-0.135

PHOTO #3=> 0011

XC = 6.310
YC = 1.412
ZC = 6.430
Omega = 2.59139
Phi = 33.55427
Kappa = -0.88122

Residuals (pixel)

PT#	Point	VX	VY
1	A!!	0.009	0.783
2	B!!	0.259	1.107
3	C!!	0.756	0.509
4	D!!	0.765	1.240
5	E!!	-0.184	-0.227
6	F!!	0.294	-0.358
7	G!!	0.017	1.132
8	H!!	0.600	0.904
9	I!!	0.397	1.044
10	J!!	0.840	0.194
11	K!!	0.327	0.234
12	L!!	0.623	0.372
13	M!!	0.516	0.446
14	N!!	0.523	0.347
15	O!!	0.495	0.281
16	P!!	0.796	0.835
17	Q!!	-0.093	0.128
18	R!!	-0.135	-0.148
19	S!!	0.456	0.263
20	T!!	0.465	-0.176
21	U!!	0.574	0.261
22	V!!	-0.401	0.276
23	X!!	-0.169	0.557
24	Y!!	0.632	-0.161
25	Z!!	0.425	0.289

PHOTO #4=> 0015

XC = -3.347
YC = 1.009
ZC = 5.758
Omega = 6.87207
Phi = -40.38921
Kappa = 4.82031

Residuals (pixel)

PT#	Point	VX	VY
1	A!!	0.023	0.537
2	B!!	0.302	0.244
3	C!!	0.768	1.140
4	D!!	0.773	0.722
5	E!!	-0.154	0.601
6	F!!	0.270	0.687
7	G!!	0.165	0.429

8	H!!	0.648	0.955
9	I!!	0.363	0.245
10	J!!	0.735	1.150
11	K!!	0.282	0.829
12	L!!	0.606	0.675
13	M!!	0.501	-0.084
14	N!!	0.539	0.101
15	O!!	0.470	0.721
16	P!!	0.805	0.806
17	Q!!	-0.134	0.144
18	R!!	-0.027	0.111
19	S!!	0.479	0.649
20	T!!	0.523	-0.171
21	U!!	0.436	0.426
22	V!!	-0.334	-0.042
23	X!!	-0.069	-0.244
24	Y!!	0.687	0.066
25	Z!!	0.392	0.118

Ground Coordinates

PT#	Point	Cod	XG	YG	ZG
1	A	0	-0.045	2.908	-0.179
2	B	0	0.715	2.665	-0.171
3	C	0	1.576	2.803	-0.171
4	D	0	2.970	2.949	-0.166
5	E	0	0.160	2.245	-0.165
6	F	0	1.044	2.127	-0.159
7	G	0	1.607	2.274	-0.161
8	H	0	2.330	2.543	-0.164
9	I	0	2.679	2.124	-0.155
10	J	0	3.243	2.178	-0.154
11	K	0	0.560	1.762	-0.152
12	L	0	1.287	1.605	-0.148
13	M	0	2.073	1.900	-0.151
14	N	0	1.969	1.397	-0.141
15	O	0	2.602	1.554	-0.141
16	P	0	3.267	1.540	-0.137
17	Q	0	-0.013	1.150	-0.141
18	R	0	0.747	0.869	-0.131
19	S	0	1.618	1.021	-0.132
20	T	0	2.615	0.760	-0.121
21	U	0	3.424	1.050	-0.128
22	V	0	0.181	0.369	-0.123
23	X	0	1.240	0.360	-0.120
24	Y	0	1.937	0.238	-0.117
25	Z	0	3.004	0.403	-0.116

Camera Calibration

F = 3742.3062
CX = 1026.2184
CY = 1146.7216
CK1 = -3.81698226610719E-0009
CK2 = -4.82392538698288E-0016
CK3 = 2.90123085148466E-0022
CP1 = -1.48596147315012E-0007
CP2 = -4.50859679653043E-0007

Calibrations Residuals

F = 75.6362
X = 2.2184
Y = 122.7216
K1 = -3.81698226610719E-0009
K2 = -4.82392538698288E-0016
K3 = 2.90123085148466E-0022
P1 = -1.48596147315012E-0007
P2 = -4.50859679653043E-0007

Camera Orientation and Location Residuals

Photo	Omeg	Phi	Kappa	XC	YC	ZC
1	-0.000	0.000	0.000	-0.000	0.000	-0.000

Adjusted Distances and Residuals

From	To	Distance	Residual
7	23	1.949	0.009

Variance-covariance Matrices using the "a priori" Variance of Unit Weight

Variance-covariance Matrix for Photo #1

Omega	1.0000E-0004				
Phi	-2.5449E-0019	1.0000E-0004			
Kappa	1.4654E-0018	-2.4694E-0019	1.0000E-0004		
XC	2.6899E-0019	-7.4595E-0018	-2.6613E-0020	1.0000E-0005	

YC 5.0032E-0018 -4.1028E-0019 -4.8618E-0018
 1.8712E-0019 1.0000E-0005
 ZC 2.1499E-0019 1.4947E-0018 -3.4444E-0019 -6.6723E-
 0019 6.8172E-0020 1.0000E-0005

Variance-covariance Matrix for Photo #2

Omega 2.3134E-0002
 Phi -2.2844E-0003 2.8846E-0002
 Kappa 7.5634E-0004 2.4117E-0004 2.2391E-0004
 XC -2.8093E-0004 1.6519E-0004 -1.0465E-0004 3.0728E-
 0004
 YC -8.9006E-0005 -2.8022E-0005 1.9485E-0005 -7.5112E-
 0006 3.1809E-0004
 ZC -4.7939E-0006 7.9879E-0005 -2.0010E-0006 1.4253E-
 0005 2.9009E-0005 1.4514E-0005

Variance-covariance Matrix for Photo #3

Omega 8.8937E-0003
 Phi -4.7676E-0004 4.9396E-0003
 Kappa -4.7352E-0003 -2.1115E-0004 1.0987E-0002
 XC 3.5226E-0005 5.9186E-0004 -9.4637E-0005 7.2909E-
 0004
 YC -8.4947E-0004 7.7125E-0005 1.3659E-0004 3.0690E-
 0005 1.0620E-0004
 ZC 1.4320E-0005 -1.5487E-0004 4.4073E-0005 -1.7968E-
 0005 -5.9638E-0006 1.7069E-0004

Variance-covariance Matrix for Photo #4

Omega 1.2585E-0002
 Phi -9.2730E-0004 6.9090E-0003
 Kappa 9.6236E-0003 1.7208E-0003 1.6681E-0002
 XC -2.9295E-0004 8.8991E-0004 -7.7784E-0006 8.5047E-
 0004
 YC -1.0324E-0003 1.0389E-0004 -5.3695E-0004 5.2972E-
 0005 1.0450E-0004
 ZC 1.5124E-0004 1.2412E-0004 1.7444E-0004 6.1856E-
 0005 -9.9512E-0006 1.6018E-0004

Variance-covariance Matrix for Pass Point #1

XG 4.0044E-0004
 YG -5.1076E-0005 3.8159E-0004
 ZG 2.5379E-0004 -2.2847E-0004 1.2528E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #2

XG 3.4489E-0004
 YG -2.0707E-0005 3.5766E-0004
 ZG 1.5343E-0004 -1.9418E-0004 1.2356E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #3
XG 3.2296E-0004
YG 4.1327E-0006 3.6751E-0004
ZG 3.9909E-0005 -2.0993E-0004 1.2392E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #4
XG 3.5722E-0004
YG 5.2949E-0005 3.8442E-0004
ZG -1.4631E-0004 -2.2700E-0004 1.2719E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #5
XG 3.7392E-0004
YG -2.3028E-0005 3.3436E-0004
ZG 2.2690E-0004 -1.4209E-0004 1.2338E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #6
XG 3.2538E-0004
YG -3.1914E-0006 3.2687E-0004
ZG 1.1103E-0004 -1.2427E-0004 1.2219E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #7
XG 3.1722E-0004
YG 6.8175E-0006 3.3392E-0004
ZG 3.7000E-0005 -1.4118E-0004 1.2261E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #8
XG 3.2793E-0004
YG 2.5404E-0005 3.5097E-0004
ZG -5.9522E-0005 -1.7507E-0004 1.2439E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #9
XG 3.3653E-0004
YG 2.6638E-0005 3.2892E-0004
ZG -1.0542E-0004 -1.2000E-0004 1.2436E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #10
XG 3.6722E-0004
YG 3.8845E-0005 3.3419E-0004
ZG -1.8188E-0004 -1.2627E-0004 1.2638E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #11
XG 3.4256E-0004
YG -3.3171E-0006 3.1452E-0004
ZG 1.7474E-0004 -7.9080E-0005 1.2194E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #12
XG 3.1490E-0004
YG 5.4319E-0006 3.0945E-0004

ZG 7.9710E-0005 -5.6530E-0005 1.2146E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #13

XG 3.1728E-0004

YG 1.3977E-0005 3.1821E-0004

ZG -2.3996E-0005 -9.2109E-0005 1.2258E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #14

XG 3.1220E-0004

YG 9.3224E-0006 3.0578E-0004

ZG -9.5923E-0006 -2.7581E-0005 1.2179E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #15

XG 3.2949E-0004

YG 1.4700E-0005 3.0955E-0004

ZG -9.4203E-0005 -4.5995E-0005 1.2321E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #16

XG 3.6409E-0004

YG 1.9030E-0005 3.1182E-0004

ZG -1.8431E-0004 -4.2770E-0005 1.2530E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #17

XG 3.7826E-0004

YG 1.2628E-0005 3.0830E-0004

ZG 2.5207E-0004 -2.4809E-0006 1.2245E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #18

XG 3.2817E-0004

YG 1.6086E-0005 3.0689E-0004

ZG 1.5182E-0004 3.6158E-0005 1.2115E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #19

XG 3.0797E-0004

YG 8.5478E-0006 3.0402E-0004

ZG 3.7043E-0005 1.9495E-0005 1.2114E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #20

XG 3.2479E-0004

YG -2.3827E-0008 3.0763E-0004

ZG -9.5438E-0005 5.7288E-0005 1.2264E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #21

XG 3.7268E-0004

YG 3.0118E-0006 3.0832E-0004

ZG -2.0576E-0004 2.2032E-0005 1.2550E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #22

XG 3.6157E-0004

YG 3.7981E-0005 3.2188E-0004

ZG 2.2872E-0004 9.9492E-0005 1.2213E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #23

XG 3.1070E-0004

YG 1.7365E-0005 3.1785E-0004

ZG 8.7684E-0005 1.0349E-0004 1.2112E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #24

XG 3.0642E-0004

YG 4.2796E-0006 3.2212E-0004

ZG -4.6723E-0006 1.2265E-0004 1.2172E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #25

XG 3.4244E-0004

YG -1.2934E-0005 3.1798E-0004

ZG -1.4846E-0004 1.0561E-0004 1.2392E-0003

Variance-covariance Matrix for Camera Calibration

F 5.6326E+0001

CX 1.0609E+0001 1.0309E+0002

CY -1.2605E+0000 3.3495E+0000 1.0034E+0002

K1 -1.2409E-0008 -2.9910E-0009 -6.2531E-0010 1.1747E-0017

K2 1.1543E-0014 2.6747E-0015 6.7197E-0016 -1.0965E-0023 1.1542E-0029

K3 -3.8425E-0021 -9.2767E-0022 -2.3810E-0022 3.5781E-0030 -4.0240E-0036 1.4649E-0042

P1 1.3087E-0008 8.9284E-0007 2.0628E-0007 -2.0270E-0017 1.6846E-0023 -4.9704E-0030 2.9843E-0014

P2 3.0373E-0008 -3.1471E-0008 9.3308E-0007 1.2744E-0016 -8.0224E-0023 1.9858E-0029 1.2677E-0015 3.5294E-0014

ANEXO II – PROCESSAMENTO DA CALIBRAGEM PARA OBJETIVA DE 80mm

DADOS DE ENTRADA

INPUT PASS POINT COORDINATES AND
VARIANCES

PT#	PONTO	COD	X	Y	Z
1	A	0	0.0200	3.1100	0.0000
2	B	0	0.8000	2.8500	0.0000
3	C	0	1.6100	2.9650	0.0000
4	D	0	3.0000	3.0900	0.0000
5	E	0	0.2000	2.4500	0.0000
6	F	0	1.0750	2.3000	0.0000
7	G	0	1.6500	2.4500	0.0000
8	H	0	2.1100	2.0750	0.0000
9	I	0	2.6900	2.2800	0.0000
10	J	0	3.2700	2.3250	0.0000
11	K	0	0.7600	1.9550	0.0000
12	L	0	1.3250	1.7850	0.0000
13	M	0	2.1100	2.0750	0.0000
14	N	0	2.0000	1.5730	0.0000
15	O	0	2.6250	1.7150	0.0000
16	P	0	3.2900	1.6930	0.0000
17	Q	0	0.0200	1.3550	0.0000
18	R	0	0.7700	1.0650	0.0000
19	S	0	1.6350	1.2050	0.0000
20	T	0	2.6250	0.9350	0.0000
21	U	0	3.4300	1.2050	0.0000
22	V	0	0.1850	0.5700	0.0000
23	X	0	1.2450	0.5450	0.0000
24	Y	0	1.9400	0.4200	0.0000
25	Z	0	3.0100	0.5600	0.0000

INPUT DATA: PHOTO#1 0019

		VARIANCE
Omega =	6.63	0.000100
Phi =	-6.52	0.000100
Kappa =	-0.55	0.000100
XC =	0.60	0.000010
YC =	0.28	0.000010
ZC =	9.70	0.000010

PHOTO COORDINATES		
POINT	X	Y
1	73.0000	1923.0000
2	482.0000	1792.0000
3	939.0000	1857.0000
4	1657.0000	1920.0000
5	181.0000	1573.0000
6	660.0000	1508.0000
7	959.0000	1583.0000
8	1335.0000	1718.0000
9	1521.0000	1501.0000
10	1810.0000	1527.0000
11	399.0000	1316.0000
12	793.0000	1231.0000
13	1208.0000	1386.0000
14	1160.0000	1121.0000
15	1491.0000	1204.0000
16	1836.0000	1197.0000
17	81.0000	984.0000
18	502.0000	832.0000
19	976.0000	918.0000
20	1511.0000	781.0000
21	1926.0000	939.0000
22	188.0000	552.0000
23	775.0000	555.0000
24	1156.0000	493.0000
25	1722.0000	591.0000

INPUT DATA: PHOTO#2 0023

VARIANCE

Omega =	6.61
Phi =	-9.04
Kappa =	88.90
XC =	0.33
YC =	0.37
ZC =	9.50

PHOTO COORDINATES		
POINT	X	Y
2	1770.0000	1662.0000
3	1837.0000	1198.0000
4	1904.0000	475.0000
5	1544.0000	1968.0000
6	1481.0000	1477.0000
7	1559.0000	1173.0000
8	1698.0000	795.0000
9	1479.0000	605.0000
10	1506.0000	316.0000

11	1282.0000	1741.0000
12	1199.0000	1337.0000
13	1360.0000	919.0000
14	1090.0000	964.0000
15	1177.0000	631.0000
16	1174.0000	286.0000
18	788.0000	1629.0000
19	881.0000	1148.0000
20	750.0000	605.0000
21	914.0000	191.0000
22	496.0000	1949.0000
23	508.0000	1348.0000
24	452.0000	960.0000
25	560.0000	392.0000

INPUT DATA: PHOTO#3 0027

VARIANCE

Omega =	0.94
Phi =	32.36
Kappa =	0.31
XC =	6.39
YC =	1.44
ZC =	7.14

PHOTO COORDINATES

POINT	X	Y
1	146.0000	1891.0000
2	476.0000	1784.0000
3	892.0000	1904.0000
5	224.0000	1528.0000
6	622.0000	1479.0000
7	902.0000	1582.0000
8	1291.0000	1775.0000
9	1487.0000	1515.0000
10	1831.0000	1567.0000
11	393.0000	1259.0000
12	734.0000	1169.0000
13	1143.0000	1359.0000
14	1082.0000	1040.0000
15	1436.0000	1139.0000
16	1842.0000	1131.0000
17	134.0000	911.0000
18	466.0000	736.0000
19	893.0000	809.0000
20	1436.0000	614.0000
21	1938.0000	788.0000
22	207.0000	462.0000
23	695.0000	415.0000

24	1052.0000	305.0000
25	1668.0000	357.0000

NPUT DATA: PHOTO#4 0031

VARIANCE

Omega =	3.82
Phi =	-40.33
Kappa =	1.81
XC =	-4.10
YC =	1.07
ZC =	6.95

PHOTO COORDINATES

POINT	X	Y
2	503.0000	1866.0000
3	917.0000	1881.0000
4	1487.0000	1858.0000
5	206.0000	1643.0000
6	667.0000	1517.0000
7	932.0000	1572.0000
8	1240.0000	1682.0000
9	1381.0000	1436.0000
10	1593.0000	1441.0000
11	421.0000	1315.0000
12	785.0000	1193.0000
13	1136.0000	1338.0000
14	1095.0000	1054.0000
15	1356.0000	1129.0000
16	1608.0000	1107.0000
17	101.0000	933.0000
18	519.0000	747.0000
19	941.0000	839.0000
20	1367.0000	690.0000
21	1669.0000	848.0000
22	211.0000	413.0000
23	765.0000	436.0000
24	1087.0000	382.0000
25	1520.0000	499.0000

OBSERVED DISTANCES AND VARIANCES

FROM	TO	DISTANCE	VARIANCE
7	23	1.940	0.0001

CAMERA CALIBRATION CONSTANTS

		VARIANCE
F =	5333.3300	100000.0000
X =	1024.0000	100000.0000
Y =	1024.0000	100000.0000

Minimum Iterations = 3

Maximum Iterations = 7

Angular Convergence = 2.0000E-0001

Calibration Convergence = 1.0000E+0002

Coordinate Convergence = 1.0000E-0001

A priori variance of unit weight = 1.0000E+0000

Photo Coordinate Variance = 1.2250E-0001

RELATÓRIO DE SAÍDA

Wednesday, Nov 15, 2000 13:45:15

Converged in 7 iterations

A priori variance of Unit Weight = 1.00000

A posteriori variance of Unit Weight = 1.18798

Computed Chi Squared = 118.79848

Degrees of Freedom = 100

PHOTO #1=> 0019

XC = 0.597

YC = 0.282

ZC = 9.699

Omega = 6.62830

Phi = -6.51752

Kappa = -0.54788

Residuals (pixel)

PT#	Point	VX	VY
1	A!!	-0.170	-0.238
2	B!!	0.114	-0.280
3	C!!	-0.295	0.297
4	D!!	-0.216	0.025
5	E!!	0.337	0.346
6	F!!	-0.341	0.167
7	G!!	0.254	-0.086
8	H!!	-0.220	0.093
9	I!!	-0.023	-0.334
10	J!!	0.025	-0.533
11	K!!	-0.139	-0.165
12	L!!	0.230	0.018
13	M!!	-0.075	0.113
14	N!!	-0.128	-0.352
15	O!!	-0.195	-0.397
16	P!!	-0.153	-0.151
17	Q!!	-0.220	-0.362
18	R!!	0.332	0.151
19	S!!	-0.264	-0.031
20	T!!	-0.122	0.243
21	U!!	0.668	0.028
22	V!!	0.056	-0.466
23	X!!	-0.308	-0.163
24	Y!!	-0.064	0.370
25	Z!!	-0.212	0.168

PHOTO #2=> 0023

XC = 0.439
YC = 0.504
ZC = 9.550
Omega = 7.02405
Phi = -8.75059
Kappa = 88.96489

Residuals (pixel)

PT#	Point	VX	VY
2	B!!	-0.803	0.019
3	C!!	0.623	-0.505
4	D!!	-0.286	-0.199
5	E!!	0.236	-0.014
6	F!!	-0.452	-0.173
7	G!!	-0.361	-0.019
8	H!!	-0.067	0.208
9	I!!	-0.266	-0.065
10	J!!	0.622	0.131
11	K!!	0.047	0.250
12	L!!	-0.290	0.140
13	M!!	0.228	-0.355
14	N!!	-0.224	-0.239
15	O!!	0.365	0.119
16	P!!	-0.144	-0.359
18	R!!	0.042	0.170
19	S!!	0.433	-0.338
20	T!!	-0.760	0.473
21	U!!	0.308	0.561
22	V!!	-0.007	-0.121
23	X!!	0.407	-0.414
24	Y!!	-0.333	-0.233
25	Z!!	-0.323	-0.461

PHOTO #3=> 0027

XC = 6.505
YC = 1.431
ZC = 7.003
Omega = 1.35272
Phi = 32.95303
Kappa = 1.02601

Residuals (pixel)

PT#	Point	VX	VY
1	A!!	-0.073	-0.039
2	B!!	-0.091	0.538
3	C!!	-0.077	-0.249
5	E!!	-0.058	-0.788
6	F!!	0.121	0.168
7	G!!	-0.063	-0.528
8	H!!	0.211	-0.240
9	I!!	-0.035	0.076
10	J!!	0.027	-0.086
11	K!!	0.283	-0.071
12	L!!	-0.019	0.485
13	M!!	-0.104	-0.121
14	N!!	-0.031	0.066
15	O!!	0.145	0.188
16	P!!	-0.080	-0.050
17	Q!!	0.151	0.105
18	R!!	0.014	-0.240
19	S!!	0.034	-0.422
20	T!!	0.307	0.039
21	U!!	-0.025	0.089
22	V!!	0.010	0.511
23	X!!	0.010	-0.691
24	Y!!	-0.004	-0.108
25	Z!!	-0.057	-0.059

PHOTO #4=> 0031

XC = -4.163
 YC = 1.048
 ZC = 6.940
 Omega = 4.13732
 Phi = -40.27059
 Kappa = 1.24862

Residuals (pixel)

PT#	Point	VX	VY
2	B!!	-0.101	0.198
3	C!!	-0.359	-0.786
4	D!!	-0.106	0.121
5	E!!	-0.295	-0.013
6	F!!	0.023	-0.160
7	G!!	-0.197	0.708
8	H!!	0.150	0.013

9	I!!	-0.101	0.266
10	J!!	-0.068	-0.161
11	K!!	0.176	-0.068
12	L!!	-0.110	-0.462
13	M!!	-0.325	-0.419
14	N!!	-0.120	0.279
15	O!!	0.109	-0.394
16	P!!	-0.232	0.215
17	Q!!	0.059	0.046
18	R!!	-0.142	-0.135
19	S!!	-0.153	-0.107
20	T!!	0.347	0.281
21	U!!	-0.178	-0.605
22	V!!	-0.050	-0.252
23	X!!	-0.172	0.252
24	Y!!	-0.172	-0.124
25	Z!!	-0.245	0.086

Ground Coordinates

PT#	Point	Cod	XG	YG	ZG
1	A	0	-0.083	3.246	-0.060
2	B	0	0.670	3.003	-0.076
3	C	0	1.523	3.136	-0.081
4	D	0	2.902	3.275	-0.096
5	E	0	0.117	2.589	-0.079
6	F	0	0.992	2.471	-0.093
7	G	0	1.553	2.615	-0.096
8	H	0	2.270	2.878	-0.098
9	I	0	2.617	2.463	-0.115
10	J	0	3.178	2.515	-0.120
11	K	0	0.510	2.112	.096
12	L	0	1.233	1.953	-0.110
13	M	0	2.014	2.244	-0.113
14	N	0	1.913	1.744	-0.123
15	O	0	2.543	1.897	-0.125
16	P	0	3.208	1.883	-0.136
17	Q	0	-0.068	1.504	-0.105
18	R	0	0.690	1.220	-0.119
19	S	0	1.562	1.369	-0.128
20	T	0	2.560	1.103	-0.144
21	U	0	3.367	1.391	-0.148
22	V	0	0.120	0.719	-0.126
23	X	0	1.180	0.706	-0.140
24	Y	0	1.881	0.581	-0.152
25	Z	0	2.952	0.742	-0.162

Camera Calibration

```

F =      5372.1698
CX =     1062.6303
CY =       947.1719
CK1 = -4.71344378586675E-0009
CK2 =  6.17891438135937E-0015
CK3 = -2.52509650396214E-0021
CP1 =  4.28854289733555E-0007
CP2 =  2.45368081526346E-0007

```

Calibrations Residuals

```

F =      38.8398
X =      38.6303
Y =     -76.8281
K1 = -4.71344378586675E-0009
K2 =  6.17891438135937E-0015
K3 = -2.52509650396214E-0021
P1 =  4.28854289733555E-0007
P2 =  2.45368081526346E-0007

```

Camera Orientation and Location Residuals

Photo	Omega	Phi	Kappa	XC	YC	ZC
1	0.000	0.000	0.000	-0.000	0.000	0.000

Adjusted Distances and Residuals

From	To	Distance	Residual
7	23	1.945	0.005

Variance-covariance Matrices using the "a priori"
Variance of Unit Weight

Variance-covariance Matrix for Photo #1

Omega	1.0000E-0004				
Phi	-1.1382E-0019	1.0000E-0004			
Kappa	8.8529E-0019	-9.2350E-0019	1.0000E-0004		
XC	2.0499E-0019	3.4268E-0019	3.3511E-0019	1.0000E-0005	
YC	-6.7068E-0019	-3.3997E-0019	-1.2488E-0018	1.1994E-0019	1.0000E-0005

ZC -1.1429E-0018 -6.0581E-0019 -7.2096E-0020
 1.0014E-0018 -1.4650E-0019 1.0000E-0005

Variance-covariance Matrix for Photo #2

Omega 6.3366E-0002
 Phi -1.0861E-0002 8.3291E-0002
 Kappa 8.1844E-0003 1.4214E-0003 1.4689E-0003
 XC 3.2952E-0005 -1.2374E-0003 -1.9284E-0004 4.9369E-0004
 YC 8.9459E-0004 2.8105E-0004 3.0952E-0004 -1.6262E-0005 3.8987E-0004
 ZC 3.2990E-0004 -3.0843E-0004 3.2716E-0005 1.0969E-0004 7.0648E-0005 5.3350E-0005

Variance-covariance Matrix for Photo #3

Omega 1.8803E-0002
 Phi -1.1644E-0003 1.0692E-0002
 Kappa -7.5516E-0003 -3.3987E-0003 3.1718E-0002
 XC -3.6692E-0004 1.8387E-0003 -3.1160E-0004 1.4840E-0003
 YC -2.4500E-0003 1.1290E-0004 1.9231E-0003 2.3776E-0004 4.0457E-0004
 ZC -1.1620E-0003 -1.3121E-0003 1.1354E-0003 -4.6745E-0004 4.3174E-0005 9.6334E-0004

Variance-covariance Matrix for Photo #4

Omega 1.2241E-0002
 Phi -1.2447E-0003 8.5013E-0003
 Kappa 9.1489E-0003 4.0279E-0003 2.8742E-0002
 XC -7.7093E-0004 8.9985E-0004 -2.1603E-0004 9.2187E-0004
 YC -1.5624E-0003 5.4509E-0005 -1.5783E-0003 -2.0956E-0005 2.3794E-0004
 ZC -8.5574E-0005 6.4264E-0004 4.5950E-0004 3.0786E-0004 -6.2258E-0005 5.9425E-0004

Variance-covariance Matrix for Pass Point #1

XG 1.4864E-0003
 YG 1.4980E-0004 1.8324E-0003
 ZG 1.0069E-0004 -2.8524E-0004 3.1232E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #2

XG 1.4062E-0003
 YG 1.9405E-0004 1.7921E-0003
 ZG 2.5752E-0005 -2.7021E-0004 3.1223E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #3
XG 1.4272E-0003
YG 2.3560E-0004 1.8197E-0003
ZG -7.9941E-0005 -2.5814E-0004 3.1827E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #4
XG 1.5130E-0003
YG 2.9902E-0004 1.8894E-0003
ZG -2.4763E-0004 -2.2200E-0004 3.3449E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #5
XG 1.3972E-0003
YG 1.7254E-0004 1.7365E-0003
ZG 9.1397E-0005 -2.5271E-0004 3.0794E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #6
XG 1.3837E-0003
YG 2.1463E-0004 1.7295E-0003
ZG -1.2930E-0005 -2.1891E-0004 3.0990E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #7
XG 1.4064E-0003
YG 2.3581E-0004 1.7565E-0003
ZG -8.4669E-0005 -2.1459E-0004 3.1429E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #8
XG 1.4583E-0003
YG 2.6585E-0004 1.8066E-0003
ZG -1.7911E-0004 -2.1737E-0004 3.2298E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #9
XG 1.4718E-0003
YG 2.7092E-0004 1.7747E-0003
ZG -2.3007E-0004 -1.7223E-0004 3.2389E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #10
XG 1.5245E-0003
YG 2.9247E-0004 1.8064E-0003
ZG -3.0386E-0004 -1.6133E-0004 3.3134E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #11
XG 1.3676E-0003
YG 1.9963E-0004 1.6878E-0003
ZG 4.5568E-0005 -2.0215E-0004 3.0627E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #12
XG 1.3715E-0003
YG 2.2113E-0004 1.6870E-0003

ZG -4.7002E-0005 -1.6614E-0004 3.0871E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #13

XG 1.4186E-0003

YG 2.4832E-0004 1.7343E-0003

ZG -1.4942E-0004 -1.6932E-0004 3.1610E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #14

XG 1.3962E-0003

YG 2.3800E-0004 1.6877E-0003

ZG -1.4042E-0004 -1.2685E-0004 3.1288E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #15

XG 1.4483E-0003

YG 2.5645E-0004 1.7207E-0003

ZG -2.2642E-0004 -1.2320E-0004 3.1970E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #16

XG 1.5108E-0003

YG 2.7335E-0004 1.7499E-0003

ZG -3.1707E-0004 -1.0503E-0004 3.2803E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #17

XG 1.3624E-0003

YG 1.8389E-0004 1.6356E-0003

ZG 1.1049E-0004 -1.6698E-0004 3.0411E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #18

XG 1.3439E-0003

YG 2.1111E-0004 1.6275E-0003

ZG 1.5866E-0005 -1.1751E-0004 3.0475E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #19

XG 1.3681E-0003

YG 2.2614E-0004 1.6533E-0003

ZG -9.7023E-0005 -1.0335E-0004 3.0920E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #20

XG 1.4303E-0003

YG 2.3861E-0004 1.6760E-0003

ZG -2.3891E-0004 -5.0814E-0005 3.1756E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #21

XG 1.5157E-0003

YG 2.6365E-0004 1.7256E-0003

ZG -3.4430E-0004 -5.8454E-0005 3.2811E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #22

XG 1.3455E-0003

YG	2.0402E-0004	1.5934E-0003	
ZG	8.0811E-0005	-9.3239E-0005	3.0449E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #23

XG	1.3440E-0003		
YG	2.1987E-0004	1.6202E-0003	
ZG	-5.5340E-0005	-5.6900E-0005	3.0712E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #24

XG	1.3725E-0003		
YG	2.2467E-0004	1.6380E-0003	
ZG	-1.5246E-0004	-2.4290E-0005	3.1162E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #25

XG	1.4608E-0003		
YG	2.3822E-0004	1.6799E-0003	
ZG	-2.9755E-0004	-1.2057E-0005	3.2183E-0003

Variance-covariance Matrix for Camera Calibration

F	1.2767E+0002			
CX	4.8431E+0000	3.9175E+0002		
CY	2.4830E+0001	6.3257E+0001	4.7727E+0002	
K1	-6.0816E-0009	-2.1293E-0009	-5.8558E-0009	8.5319E-0018
K2	8.0065E-0015	1.2719E-0015	1.4968E-0014	-7.1958E-0024
K3	-2.1670E-0021	-9.0481E-0022	-7.1356E-0021	2.2027E-0030
P1	-1.0830E-0007	3.3224E-0006	1.0841E-0007	5.9043E-0017
P2	-1.4406E-0007	1.3117E-0006	4.3782E-0006	-2.3528E-0016
	5.9462E-0023	-3.5386E-0029	2.5632E-0016	8.1189E-0014

ANEXO III – OBSERVAÇÕES EXTERNAS AO TALHÃO – Experimento 2 **em Dendrometria**

Monday, Dec 11, 2000 12:01:34

Converged in 5 iterations

A priori variance of Unit Weight = 1.00000

A posteriori variance of Unit Weight = 1.29500

Computed Chi Squared = 72.52019

Degrees of Freedom = 56

PHOTO #1=> 32

XC = 12.098

YC = 1.390

ZC = 55.818

Omega = 8.00000

Phi = -0.00000

Kappa = 0.00000

Residuals (mm)

PT#	Point	VX	VY
1	S1!!	0.188	0.038
2	S2!!	0.253	0.121
3	R1!!	-0.250	-0.108
4	R2!!	-0.128	0.250
5	Q1!!	0.138	0.155
6	Q2!!	0.024	0.791
7	P1!!	0.093	-0.093
8	P2!!	0.443	0.189
9	T1!!	-0.078	-0.351
10	T2!!	0.162	-0.391
11	U1!!	-0.507	0.075
12	U2!!	0.752	0.167
13	V1!!	-0.712	-0.564
14	V2!!	0.028	-0.339
15	W1!!	0.414	0.135
16	W2!!	0.407	-0.199
17	X1!!	-0.422	-0.071
18	X2!!	0.072	0.193
19	P3!!	-0.903	-0.008

PHOTO #2=> 38

XC = 0.623

YC = 1.837

ZC = 55.105

Omega = 5.35057
 Phi = -10.03934
 Kappa = 0.97403

Residuals (mm)

PT#	Point	VX	VY
1	S1!!	-0.093	-0.045
2	S2!!	-0.123	-0.058
3	R1!!	0.109	-0.062
4	R2!!	0.065	-0.138
5	Q1!!	-0.047	-0.089
6	Q2!!	-0.044	-0.540
7	P1!!	-0.011	0.162
8	P2!!	-0.183	0.384
9	T1!!	0.045	0.230
10	T2!!	-0.076	0.385
11	U1!!	0.215	-0.540
12	U2!!	-0.405	-0.074
13	V1!!	0.365	0.221
14	V2!!	-0.008	0.358
15	W1!!	-0.208	0.092
16	W2!!	-0.230	-0.252
17	X1!!	0.231	0.199
18	X2!!	-0.040	-0.196
19	P3!!	0.446	-0.031

PHOTO #3=> 41

XC = 23.717
 YC = 0.812
 ZC = 56.292
 Omega = 6.85955
 Phi = 11.03006
 Kappa = -2.79327

Residuals (mm)

PT#	Point	VX	VY
1	S1!!	-0.100	-0.037
2	S2!!	-0.143	-0.031
3	R1!!	0.141	0.118
4	R2!!	0.076	-0.046
5	Q1!!	-0.087	-0.185
6	Q2!!	0.020	-0.149
7	P1!!	-0.059	-0.104

8	P2!!	-0.249	-0.574
9	T1!!	0.026	0.204
10	T2!!	-0.087	-0.066
11	U1!!	0.282	0.476
12	U2!!	-0.391	-0.104
13	V1!!	0.361	0.339
14	V2**	-0.019	0.016
15	W1!!	-0.214	-0.184
16	W2!!	-0.200	0.397
17	X1!!	0.202	-0.087
18	X2!!	-0.032	-0.036
19	P3!!	0.483	0.056

Ground Coordinates

PT#	Point	Cod	XG	YG	ZG
1	S1	0	1.248	0.027	-4.400
2	S2	0	1.183	1.513	-4.373
3	R1	0	2.130	0.477	-9.144
4	R2	0	2.275	1.744	-9.150
5	Q1	0	6.789	0.274	-7.633
6	Q2	0	6.729	1.627	-7.723
7	P1	0	9.380	0.259	-2.283
8	P2	0	9.365	1.	-2.291
9	T1	0	11.604	0.266	-6.420
10	T2	0	11.537	1.619	-6.386
11	U1	0	13.143	-0.302	-1.292
12	U2	0	13.130	1.428	-1.287
13	V1	0	15.420	0.161	-7.628
14	V2	0	15.522	1.600	-7.640
15	W1	0	18.477	0.546	-14.760
16	W2	0	18.467	1.883	-14.743
17	X1	0	22.142	0.405	-18.201
18	X2	0	22.054	1.844	-18.217
19	P3	0	8.244	14.246	-2.645

Camera Orientation and Location Residuals

Photo	Omega	Phi	Kappa	XC	YC	ZC
1	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Adjusted Distances and Residuals

From	To	Distance	Residual
1	2	1.487	-0.003
3	4	1.276	-0.004
5	6	1.357	-0.008
7	8	1.128	-0.002
9	10	1.355	0.005
11	12	1.730	-0.000
13	14	1.443	-0.002
15	16	1.338	0.003
17	18	1.442	0.002
7	11	3.932	0.002
8	12	3.896	0.001

Variance-covariance Matrices using the "a priori" Variance of Unit Weight

Variance-covariance Matrix for Photo #1

Omega	1.0000E-0004				
Phi	-3.2678E-0019	1.0000E-0004			
Kappa	-9.3812E-0019	-6.5021E-0019	1.0000E-0004		
XC	2.4054E-0020	-2.9619E-0019	7.5058E-0020	1.0000E-0005	
YC	-2.1220E-0019	-3.6482E-0020	5.3686E-0020	3.5595E-0021	1.0000E-0005
ZC	1.0418E-0020	2.2965E-0020	-1.3088E-0020	3.6717E-0021	1.1133E-0021
	1.1133E-0021	1.0000E-0005			

Variance-covariance Matrix for Photo #2

Omega	3.9827E-0004				
Phi	3.0071E-0004	1.2047E-0002			
Kappa	-9.0869E-0005	-1.1845E-0003	3.8985E-0004		
XC	3.2821E-0004	1.2729E-0002	-1.2803E-0003	1.3921E-0002	
YC	-3.2955E-0004	-5.3838E-0004	1.2246E-0004	-5.9379E-0004	3.8279E-0004
ZC	8.8195E-0005	3.3052E-0003	-3.3194E-0004	3.5160E-0003	-1.5455E-0004
	-1.5455E-0004	1.1969E-0003			

Variance-covariance Matrix for Photo #3

Omega	5.8638E-0004				
Phi	1.0739E-0003	1.2667E-0002			
Kappa	-3.2303E-0004	-1.6372E-0003	5.0322E-0004		
XC	1.1636E-0003	1.3439E-0002	-1.7685E-0003	1.4757E-0002	
YC	-5.0985E-0004	-8.2538E-0004	3.1107E-0004	-9.2117E-0004	5.5416E-0004

ZC -4.6608E-0004 -5.2006E-0003 6.9615E-0004 -
5.4487E-0003 3.6020E-0004 2.4802E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #1

XG 4.4303E-0004
YG 3.5942E-0005 1.3492E-0004
ZG 1.7349E-0003 2.0172E-0004 9.7836E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #2

XG 4.4745E-0004
YG -2.0814E-0006 1.3050E-0004
ZG 1.7503E-0003 -1.0574E-0005 9.8163E-0003

Variance-covariance Matrix for Pass Point #3

XG 4.3715E-0004
YG 2.6118E-0005 1.5185E-0004
ZG 1.9079E-0003 1.7517E-0004 1.2815E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #4

XG 4.2985E-0004
YG -7.8882E-0006 1.4946E-0004
ZG 1.8857E-0003 -5.2091E-0005 1.2840E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #5

XG 2.1528E-0004
YG 1.5098E-0005 1.4290E-0004
ZG 9.0534E-0004 1.8368E-0004 1.1057E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #6

XG 2.1633E-0004
YG -2.3114E-0006 1.4020E-0004
ZG 9.0584E-0004 -2.6869E-0005 1.0972E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #7

XG 1.3899E-0004
YG 8.1128E-0006 1.2218E-0004
ZG 4.5173E-0004 1.8371E-0004 1.0366E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #8

XG 1.3925E-0004
YG 2.9326E-0007 1.1886E-0004
ZG 4.5513E-0004 7.0365E-0006 1.0370E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #9

XG 1.3504E-0004
YG 1.4211E-0006 1.3680E-0004
ZG 8.2586E-0005 1.7357E-0004 1.0453E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #10

XG	1.3503E-0004		
YG	-2.4096E-0007	1.3377E-0004	
ZG	9.2869E-0005	-2.7758E-0005	1.0504E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #11

XG	1.2003E-0004		
YG	-5.4201E-0006	1.2429E-0004	
ZG	-2.1062E-0004	3.1107E-0004	1.1722E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #12

XG	1.1978E-0004		
YG	-8.9757E-0008	1.1584E-0004	
ZG	-2.0902E-0004	7.4176E-0006	1.1782E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #13

XG	1.6959E-0004		
YG	-1.0473E-0005	1.4304E-0004	
ZG	-5.7497E-0004	2.0452E-0004	1.1271E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #14

XG	1.7125E-0004		
YG	1.3230E-0006	1.3938E-0004	
ZG	-5.9054E-0004	-2.4882E-0005	1.1268E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #15

XG	3.7570E-0004		
YG	-2.5550E-0005	1.7488E-0004	
ZG	-2.2810E-0003	2.8726E-0004	2.5744E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #16

XG	3.7496E-0004		
YG	1.4052E-0005	1.7257E-0004	
ZG	-2.2760E-0003	-1.5681E-0004	2.5717E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #17

XG	9.8358E-0004		
YG	-7.2999E-0005	1.9773E-0004	
ZG	-5.8966E-0003	5.4452E-0004	4.4099E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #18

XG	9.6789E-0004		
YG	3.0285E-0005	1.9220E-0004	
ZG	-5.8243E-0003	-2.2610E-0004	4.3898E-0002

Variance-covariance Matrix for Pass Point #19

XG	1.7514E-0004			
YG	-1.4912E-0004	6.0651E-0004		
ZG	7.1003E-0004	-2.2521E-0003	1.0815E-0002	

ANEXO IV – OBSERVAÇÕES DAS ARAUCÁRIAS – Experimento 3 em Dendrometria

Monday, Dec 11, 2000 12:12:23

Converged in 3 iterations

A priori variance of Unit Weight = 1.00000

A posteriori variance of Unit Weight = 1.33275

Computed Chi Squared = 17.32577

Degrees of Freedom = 13

PHOTO #1=> 0057

XC = 10.000

YC = 1.425

ZC = 44.400

Omega = 6.00000

Phi = -0.00000

Kappa = 0.00000

Residuals (mm)

PT#	Point	VX	VY
1	A1!!	-0.238	-0.347
2	A2!!	-0.103	0.438
3	B1!!	0.244	0.063
4	B2!!	0.848	-0.388
5	C1!!	-0.421	-0.123
6	C2!!	-0.517	-0.861
7	D1!!	-0.312	0.490
8	D2!!	0.514	0.728

PHOTO #2=> 0047

XC = 15.700

YC = 1.162

ZC = 41.429

Omega = 7.38637

Phi = 7.58438

Kappa = -2.42087

Residuals (mm)

PT#	Point	VX	VY
1	A1!!	0.107	0.334
2	A2!!	0.042	-0.341
3	B1!!	-0.115	-0.304
4	B2!!	-0.372	0.460
5	C1!!	0.190	-0.084
6	C2!!	0.227	0.465
7	D1!!	0.151	0.038
8	D2!!	-0.236	-0.569

PHOTO #3=> 0051

XC = 3.941
 YC = 1.777
 ZC = 46.624
 Omega = 6.99145
 Phi = -7.08757
 Kappa = 0.13199

Residuals (mm)

PT#	Point	VX	VY
1	A1!!	0.128	-0.007
2	A2!!	0.089	-0.083
3	B1!!	-0.129	0.272
4	B2!!	-0.527	-0.117
5	C1!!	0.232	0.232
6	C2!!	0.273	0.404
7	D1!!	0.170	-0.561
8	D2!!	-0.250	-0.136

Ground Coordinates

PT# Alt	Point	Cod	XG	YG	ZG
1	A1	0	6.642	0.744	12.435
2	A2	0	6.331	11.174	12.481
3	B1	0	8.144	0.105	5.450
4	B2	0	8.111	11.769	4.904
5	C1	0	9.432	-0.315	0.070
6	C2	0	10.109	12.171	-0.557
7	D1	0	16.054	-0.159	0.013
8	D2	0	16.199	8.455	-0.563

Camera Orientation and Location Residuals

Photo	Omega	Phi	Kappa	XC	YC	ZC
1	-0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Adjusted Distances and Residuals

From	To	Distance	Residual
1	7	15.611	0.001

Variance-covariance Matrices using the "a priori" Variance of Unit Weight

Variance-covariance Matrix for Photo #1

Omega	1.0000E-0004				
Phi	1.5397E-0020	1.0000E-0004			
Kappa	-2.2821E-0020	-9.6037E-0020	1.0000E-0004		
XC	1.4115E-0021	-9.5532E-0020	1.7801E-0020	1.0000E-0005	
YC	-5.1275E-0020	-6.8590E-0021	-6.4666E-0021	1.1734E-0021	1.0000E-0005
ZC	8.6875E-0021	-1.8894E-0020	-1.9798E-0021	2.4174E-0021	3.3879E-0021

Variance-covariance Matrix for Photo #2

Omega	1.2569E-0003				
Phi	1.1103E-0003	9.5288E-0003			
Kappa	-8.9252E-0004	-6.3363E-0004	1.3832E-0003		
XC	1.3140E-0003	9.5903E-0003	-8.9622E-0004	1.1341E-	
0002					
YC	-7.5791E-0004	-7.4968E-0004	6.0573E-0004	-9.5051E-	
0004	5.2326E-0004				
ZC	-6.5148E-0004	-3.2454E-0003	5.4821E-0004	-4.2258E-	
0003	4.5336E-0004	1.9232E-0003			

Variance-covariance Matrix for Photo #3

Omega	8.4433E-0004				
Phi	5.3292E-0004	6.7145E-0003			
Kappa	-3.5491E-0004	-1.3732E-0004	1.1050E-0003		
XC	7.6340E-0004	8.0147E-0003	-3.9968E-0004	1.1547E-	
0002					
YC	-5.6948E-0004	-6.6495E-0004	2.6510E-0004	-9.8303E-	
0004	4.6293E-0004				
ZC	-1.6517E-0004	-5.7394E-0004	1.8809E-0004	-1.5101E-	
0003	1.6275E-0004	6.5251E-0004			

Variance-covariance Matrix for Pass Point #1

XG	1.4005E-0003		
YG	2.7705E-0004	1.0843E-0004	
ZG	1.2850E-0002	2.6413E-0003	1.2238E-0001

Variance-covariance Matrix for Pass Point #2

XG	1.6299E-0003		
YG	-4.1859E-0003	1.1174E-0002	
ZG	1.3698E-0002	-3.6386E-0002	1.1911E-0001

Variance-covariance Matrix for Pass Point #3

XG	3.8843E-0004		
YG	2.2686E-0004	2.2511E-0004	
ZG	6.7635E-0003	4.7565E-0003	1.4175E-0001

Variance-covariance Matrix for Pass Point #4

XG	3.9649E-0004		
YG	-1.7749E-0003	9.7648E-0003	
ZG	6.7831E-0003	-3.7040E-0002	1.4160E-0001

Variance-covariance Matrix for Pass Point #5

XG	1.0923E-0004		
YG	7.6517E-0005	3.0524E-0004	
ZG	1.9913E-0003	5.7761E-0003	1.4990E-0001

Variance-covariance Matrix for Pass Point #6

XG	9.0784E-0005		
YG	7.5480E-0005	8.6704E-0003	

ZG -3.1425E-0004 -3.5950E-0002 1.5071E-0001

Variance-covariance Matrix for Pass Point #7

XG 2.6423E-0003

YG -6.5592E-0004 2.5240E-0004

ZG -1.8691E-0002 4.7960E-0003 1.3669E-0001

Variance-covariance Matrix for Pass Point #8

XG 2.8051E-0003

YG 3.0580E-0003 3.5293E-0003

ZG -1.9678E-0002 -2.2147E-0002 1.4259E-0001